

**Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne
występowania postaci i typów opadów
atmosferycznych na przykładzie Krakowa**

Temporal variability in the form and type
of precipitation in Kraków in relation
to circulation patterns

Robert Twardosz, Ewa Łupikasz, Tadeusz Niedźwiedź

Zmienność i uwarunkowania cyrkulacyjne występowania postaci i typów opadów atmosferycznych na przykładzie Krakowa

**Temporal variability in the form and type
of precipitation in Kraków in relation
to circulation patterns**

Praca naukowa finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Projektu Badawczego o numerze N N306119936 zrealizowanego we współpracy między Zakładem Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego i Katedrą Klimatologii Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w latach 2009–2011

RECENZENCI

dr hab. Bogusław Michał Kaszewski, prof. UMCS
prof. dr hab. Janina Trepińska

PROJEKT OKŁADKI

Paweł Bigos

© Copyright by Robert Twardosz, Ewa Łupikasza, Tadeusz Niedźwiedź & Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego
Wydanie I, Kraków 2011
All rights reserved

Niniejszy utwór ani żaden jego fragment nie może być reprodukowany, przetwarzany i rozpowszechniany w jakikolwiek sposób za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych oraz nie może być przechowywany w żadnym systemie informatycznym bez uprzedniej pisemnej zgody Wydawcy

ISBN 978-83-233-3177-3



www.wuj.pl

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego
Redakcja: ul. Michałowskiego 9/2, 31-126 Kraków
tel. 12-631-18-80, tel./fax 12-631-18-83
Dystrybucja: tel. 12-631-01-97, tel./fax 12-631-01-98
tel. kom. 0506-006-674, e-mail: sprzedaz@wuj.pl
Konto: PEKAO SA, nr 80 1240 4722 1111 0000 4856 3325

SPIS TREŚCI

CZĘŚĆ I

1. WSTĘP.....	7
1.1. Wprowadzenie.....	7
1.2. Klasyfikacje postaci i typów opadów atmosferycznych.....	10
1.3. Zagadnienie postaci i typów opadów w literaturze.....	11
1.4. Materiał badawczy.....	13
1.4.1. Dane opadowe.....	13
1.4.2. Typologia układów cyrkulacyjnych według T. Niedźwiedzia	17
1.5. Metody badań.....	19
2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W KRAKOWIE.....	23
2.1. Liczba dni z opadem.....	23
2.2. Sumy opadów.....	27
3. CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA W POLSCE POŁUDNIOWEJ	33
3.1. Typy cyrkulacji.....	33
3.2. Masy powietrzne	34
3.3. Fronty atmosferyczne	36

CZĘŚĆ II

4. OPADY CIEKŁE.....	37
4.1. Występowanie i sumy opadów ciekłych.....	37
4.2. Związek opadów ciekłych z temperaturą powietrza	42
4.3. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów ciekłych.....	44
4.4. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady ciekłe.....	52
4.4.1. Związek opadów ciekłych z typami cyrkulacji.....	52
4.4.2. Związek opadów ciekłych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	57
4.4.3. Związek opadów ciekłych ze wskaźnikami cyrkulacji.....	63
5. OPADY ŚNIEGU	69
5.1. Okres występowania opadów śniegu	69
5.2. Występowanie i sumy opadów śniegu.....	72

5.3. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów śniegu.....	75
5.4. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady śniegu.....	85
5.4.1. Związek opadów śniegu z typami cyrkulacji.....	85
5.4.2. Związek opadów śniegu z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	90
5.4.3. Związek opadów śniegu ze wskaźnikami cyrkulacji	95
6. OPADY MIESZANE.....	99
6.1. Występowanie i sumy opadów mieszanych	99
6.2. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów mieszanych	102
6.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady mieszane	111
6.3.1. Związek opadów mieszanych z typami cyrkulacji	111
6.3.2. Związek opadów mieszanych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	114
6.3.3. Związek opadów mieszanych ze wskaźnikami cyrkulacji.....	121
7. OPADY BURZOWE I GRADY.....	125
7.1. Występowanie i sumy opadów burzowych	125
7.2. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów burzowych	130
7.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady burzowe.....	135
7.3.1. Związek opadów burzowych z typami cyrkulacji	135
7.3.2. Związek opadów burzowych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi	138
8. OPADY MARZNĄCE	143
9. ZMIENNOŚĆ LICZBY DNI Z OPADEM W LATACH 1812–1855	147
9.1. Przebieg roczny	147
9.2. Przebieg wieloletni	151
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	157
LITERATURA.....	163

CZĘŚĆ I

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Praca zawiera wyniki badań dotyczących zmienności rocznej i wieloletniej oraz uwarunkowań cyrkulacyjnych postaci i typów opadów atmosferycznych. Podstawę opracowania stanowi sekularna seria obserwacji opadów przy dawnym Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Przeprowadzone bardzo szczegółowe badania opadów były możliwe dzięki finansowemu wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Projektu Badawczego o numerze **NN306119936**, realizowanego we współpracy między Zakładem Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego i Katedrą Klimatologii Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w latach 2009–2011.

Z czwartego raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC, 2007) dowiadujemy się, że średnia globalna temperatura powietrza w latach 1906–2005 wzrosła o około $0,74^{\circ}\text{C}$, a największa koncentracja lat ciepłych wystąpiła na przełomie XX i XXI wieku. W świetle oceny współczesnych zmian klimatu w Europie (Klein Tank i in., 2002) potwierdza się bezprecedensowy wzrost temperatury w ostatnich latach. Wzrost ten jest szczególnie silnie zaznaczony w zachodniej i środkowej Europie, gdzie trendy wzrostowe przekraczają $0,5^{\circ}\text{C}$ na 10 lat (rys. 1.1). Ocieplenie przybrało duże rozmiary w pierwszym dziesięcioleciu XXI wieku; temperatura średnia roczna była wyższa od średniej wieloletniej, np. w Krakowie średnia temperatura w roku 2000 i 2008 osiągnęła aż $11,0^{\circ}\text{C}$ i była najwyższa w całym okresie prowadzonych pomiarów instrumentalnych 1792–2008 (rys. 1.2). Wyjątkowo wysokie wartości temperatury powietrza występowały w sezonach letnich 2003 i 2006 roku (Twardosz, 2009), a na skutek silnego stresu gorąca śmierć poniosło wielu mieszkańców Europy Zachodniej.

Mówiąc o współczesnych zmianach klimatu, mamy na myśli przede wszystkim zmiany temperatury. O ile w przebiegu wieloletnim temperatury powietrza stwierdza się istotny statystycznie trend wzrostowy, to w przypadku opadów atmosferycznych trendy zmian nie są już tak jednoznaczne. Jak stwierdził K. Kozuchowski (2004), w przypadku opadów mamy do czynienia raczej z nieregularnymi fluktuacjami i przemieszczaniem się nadmiarów i niedoborów opadów aniżeli z trwałym ich trendem. Scenariusze zmian opadów uzyskiwane z modeli klimatycznych są obciążone znacznie większym błędem niż temperatury powietrza (Bradley i in., 1987; Kozuchowski,

2004). Przewidywanie opadów na dalszą przyszłość jest trudne ze względu na ich dużą zmienność czasową i przestrzenną. Trzeba pamiętać także o tym, że o występowaniu opadów decyduje nie tylko temperatura, ale także wiele innych czynników.

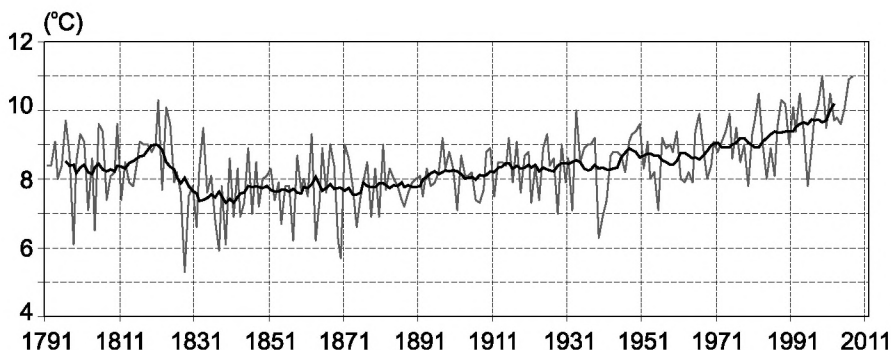
Opady atmosferyczne można opisywać ze względu na różne cechy. Badania zmian i zmienności opadów najczęściej opierają się na ich podstawowej charakterystyce – sumach, co wynika z faktu, że większość pomiarów opadu, np. z deszczomierzy, dotyczy tylko ilości spadłej wody w określonym przedziale czasu, najczęściej doby lub miesiąca. Jest też wiele innych, chociaż rzadziej stosowanych charakterystyk opadu, takich jak częstość występowania, natężenie czy postać i typ opadów.

Postać opadów zależy od stanu skupienia wody docierającej do podłoża. Jeśli woda dociera do podłoża w stanie ciekłym, to mówimy wtedy o opadach ciekłych, np. deszczu, jeśli zaś dociera w stanie stałym, to mówimy o opadach stałych, np. śniegu. Ze względu na fakt, że do opadów stałych zaliczane są także opady gradu, które omawiane są łącznie z burzami, w dalszej części pracy jako przeciwieństwo opadów ciekłych będą traktowane opady śnieżne (patrz rozdział 5). Różne postacie opadu mogą występować razem, np. deszcz i śnieg – opad mieszany. Gdy podczas opadu występują zjawiska atmosferyczne, np. burza, to możemy mówić o określonym typie opadu, np. opadzie burzowym, burzy z gradem itd. Typ opadu możemy traktować jako pojęcie bardziej ogólne. Na przykład, wydzielając opady ze względu na ich pochodzenie, mówimy o typie genetycznym opadu – frontowym lub wewnątrzmasowym. Należy tu zaznaczyć, że w literaturze anglosaskiej na określenie pochodzenia opadu nie stosuje się pojęcia *typ genetyczny opadu*, tylko typ opadu.

Charakterystyka dotycząca postaci i typów opadów jest rzadko stosowana w opracowaniach klimatologicznych, głównie ze względu na fakt, że w wielu bazach danych i publikacjach rocznikowych pomija się szczegółowe informacje o rodzaju opadu. Kodowanie rodzajów opadów wymaga bowiem dokładnych informacji o zjawiskach meteorologicznych, których uzyskanie jest możliwe tylko w przypadku całodobowych obserwacji wizualnych. Dlatego też niewiele jest stacji meteorologicznych na świecie, w których dysponuje się sekularnymi ciągami danych o postaci i typie opadu.

Klasyfikacja postaci opadów atmosferycznych może być także dokonana w sposób pośredni. Polega ona na wykorzystaniu empirycznej zależności postaci opadu od temperatury dolnej warstwy atmosfery (Kupczyk, 1997). Ta automatyczna klasyfikacja wykazuje jednak wiele niedoskonałości. Jak podkreśliła E. Kupczyk (1997), w porach przejściowych, zwłaszcza w strefie umiarkowanych szerokości geograficznych, występują duże wahania temperatury powietrza i warunków tworzenia się opadów w ciągu doby.

Badania postaci i typów opadów, zwłaszcza opadów śnieżnych i burzowych, mają duże znaczenie klimatyczne. Wielu klimatologów podkreśla, że śnieg i pokrywa śnieżna są ważnym komponentem systemu klimatycznego, który może być dobrym wskaźnikiem sprawdzania i monitoringu zmian globalnych (Namias, 1985; Dobrowolny, 1993; Jaagus, 1997; Hantel i in., 2000; Huntington i in., 2004; Twardosz, 2010). Jeśli następuje istotny wzrost temperatury powietrza, to wydaje się słuszne założenie, że można oczekiwać w zimie spadku częstości opadów śnieżnych na korzyść opadów ciekłych oraz wzrostu częstości opadów konwekcyjnych w lecie. Tak



Rys. 1.2. Przebieg wieloletni średniej rocznej temperatury powietrza w Krakowie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1792–2008)

Fig. 1.2. Long-term variation in mean annual temperature in Kraków; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1792–2008)

postawiona hipoteza badawcza jest jednak tylko pozornie prosta. Występowanie opadów atmosferycznych, bez względu na ich postać i typ, zależy bowiem nie tylko od temperatury powietrza. Istnieje wiele innych czynników decydujących o opadach, spośród których duże znaczenie ma zawartość pary wodnej w powietrzu, a także uwarunkowania lokalne, związane np. z rodzajem podłoża. Ponadto, jak stwierdził H. Ye (2008), złożoność systemu klimatycznego oraz sprzężenia zwrotne w nim występujące między poszczególnymi jego komponentami powodują, że zrozumienie relacji między typem opadu a jego częstotliwością nie jest łatwe, zwłaszcza w wysokich szerokościach geograficznych, gdzie w porze chłodnej temperatura powietrza często osiąga wartość poniżej punktu zamarzania. Jak podkreślili R.E. Davis i in. (1999), relacje między opadem a temperaturą powietrza są słabo rozpoznane i udokumentowane. Z kolei badanie zmian opadów burzowych może być przydatne do weryfikacji często prezentowanej w literaturze klimatologicznej hipotezy o rosnącej częstotliwości występowania silnych opadów, a także o prognozowanym wzroście natężenia opadów w strefie umiarkowanej. Opady śnieżne, jak i burzowe są istotnym ogniwem w obiegu wody (Changnon, 2001). Badanie postaci i typów opadów jest zatem przydatne nie tylko w aspekcie badań współczesnych zmian klimatycznych, ale także oceny ich wpływu na cykl hydrologiczny. Potencjalne korzyści lub straty wynikłe z prognozowanego wzrostu opadów w Polsce pod wpływem ocieplania klimatu są zależne od tego, w jakiej postaci opady będą występować oraz jakie będą osiągać natężenie. Podobne pytanie sformułował H. Ye (2008) w odniesieniu do przewidywanych zmian opadów w wysokich szerokościach geograficznych.

Należy także wskazać na praktyczny aspekt badań postaci i typów opadów. Istnieje wiele niedogodności, zwłaszcza w miastach oraz transporcie drogowym i lotniczym, powstających na skutek występowania silnych opadów śnieżnych (Spreitzhofer, 1999a) i opadów marznących (Gay i Davis, 1993; Changnon i Creech, 2003;

Changnon i Karl, 2003; Changnon i Changnon, 2006; Houston i Changnon, 2007). Opady śnieżne, w odpowiednich warunkach termicznych, tworzą pokrywę śnieżną, z którą mogą być związane groźne zdarzenia i zjawiska; szybkie jej topnienie może wywołać gwałtowne wezbrania i w konsekwencji powódź na znacznym obszarze (Kossowska-Cezak i Bajkiewicz-Grabowska, 2008). Ponadto występowanie pokrywy śnieżnej o znacznej grubości może być przyczyną katastrof budowlanych. Warto w tym miejscu wspomnieć o największej katastrofie budowlanej, jaka zdarzyła się w Polsce 28 stycznia 2006 roku. Podczas trwania wystawy gołębi pocztowych zawalił się dach hali Międzynarodowych Targów Katowickich, w wyniku czego zginęło 65 osób, a ponad 170 zostało rannych, w tym 13 cudzoziemców. Bezpośrednią przyczyną tej tragedii była zalegająca na dachu gruba warstwa lodu i śniegu. W porze letniej występują również utrudnienia w komunikacji i transporcie spowodowane przez opady burzowe o dużym natężeniu. W miastach często dochodzi do niedrożności sieci kanalizacji burzowej, co skutkuje lokalnymi podtopieniami i zalewaniem terenów niżej położonych. Takie zdarzenia zwykle powodują duże straty finansowe, np. w USA sięgają one miliardów dolarów (Changnon i Creech, 2003).

1.2. Klasyfikacje postaci i typów opadów atmosferycznych

Światowa Organizacja Meteorologiczna (WMO, 1988) przy obserwacjach i w depeszach synoptycznych wyróżnia aż 100 kodów „ww” (00–99), którym są przypisane zjawiska występujące w czasie obserwacji bądź w ciągu godziny poprzedzającej obserwację (ww = 20–29), oraz dziesięciocyfrowe kody „W1” i „W2” (0–9) w celu określenia najważniejszych zjawisk atmosferycznych, jakie występowały między kolejnymi terminami obserwacji (tzw. pogoda ubiegła). W większości tych kodów są zawarte informacje o opadzie. Tak rozbudowana, bardzo szczegółowa skala zjawisk jest uniwersalna, tzn. przystosowana do różnych typów klimatu. W związku z tym niektóre z tych zjawisk w umiarkowanych szerokościach geograficznych występują rzadko lub w ogóle się nie pojawiają. Dlatego też w opracowaniach klimatologicznych znalazła zastosowanie klasyfikacja postaci i typów opadów zaproponowana przez T. Niedźwiedzia (tab. 1.1), wykorzystana np. w pracy R. Twardosza (2007a) oraz R. Twardosza i in. (2010a), a także w bazach danych opadowych. W klasyfikacji tej każdemu opadowi dobowemu przypisuje się tylko jeden kod postaci i typu według 10-stopniowej skali (w której uwzględniono także dni bezopadowe, ale z burzą oraz dni z opadem śladowym z burzą). Numer kodu informuje o postaci opadu, tj. ciekłym lub śnieżnym, a także jednocześnie o występujących opadach mieszanych oraz dodatkowo o zjawiskach burzowych. Do opadów burzowych zalicza się tylko te, którym towarzyszyły zjawiska akustyczne (grzmoty) i elektryczne (błyskawice). Burze oznaczono numerami 6, 7, 8 i 9. Numery od 7 do 9 dotyczą tylko opadów burzowych o różnej postaci; numer 6 dotyczy dni z burzą odległą, ale bez opadów w miejscu obserwacji. Zatem suma przypadków kodów opadów od 6 do 9 daje informację o liczbie dni z burzą.

Tabela 1.1. Kody typów opadów atmosferycznych i towarzyszące im zjawiska atmosferyczne (opracowane przez T. Niedźwiedzia) oraz odpowiadające im kody zjawisk WMO: ww oraz W1–W2

Table 1.1. Codes of precipitation types with accompanying weather phenomena (according to T. Niedźwiedź) and corresponding ww and W1–W2 WMO weather codes

Numer kodu Code number	Charakterystyka zjawisk Phenomena characteristic	ww	W1–W2
0	Dzień bez opadu i burzy Day without precipitation and thunderstorm	00–16, 30–39	0–3
1	Deszcz, mżawka (opad ciekły) Rain, drizzle (liquid precipitation)	20–21, 24, 25, 50–59, 60–67, 80–82	5, 6, (8)
2	Deszcz ze śniegiem (opad mieszany) Rain with snow (mixed precipitation)	23, 68–69, 83–84	
3	Śnieg – różne postacie (śnieg, śnieg ziarnisty, igły lodowe, krupa śnieżna) Snow – different forms (also diamond dust, snow crystals, snow grains, ice pellets)	22, 26–27, 70–78, 85–88	7 (8)
4	Brak opadów, w deszczomierzu woda z osadu, mgły No precipitation, water in rain-gauge from deposits or fog with rime	28, 40–49	4
5	Grad bez burzy Hail without thunderstorm	90–91	
6	Burza odległa, bez opadu na stacji lub z opadem śladowym na stacji Distant thunderstorm, no precipitation at the station or trace precipitation	17	
7	Burza z opadem śniegu lub śniegu z deszczem Thunderstorm with snow or mixed precipitation	93–94	
8	Opad burzowy (tylko deszcz, bez śniegu i gradu) Thunderstorm with rain (without snow and hail)	29, 91–95, 97–98	9
9	Burza z opadem gradu Thunderstorm with hail (hailstorm)	96, 99	

1.3. Zagadnienie postaci i typów opadów w literaturze

W Polsce, jak i na świecie najwięcej uwagi – jak dotychczas – poświęcano opadom w postaci śnieżnej, a zwłaszcza opadom śnieżnym. Wynika to stąd, że obecnie dużą wagę przywiązuje się do rozpoznania reakcji opadów śnieżnych na współczesne ocieplenie klimatu (Davis i in., 1999; IPCC, 2007; Ye, 2008), co zostało omówione we wprowadzeniu.

Starsze opracowania opadów śnieżnych w Polsce dotyczyły głównie ich rozkładu przestrzennego. Do pionierskich opracowań w tym zakresie należy praca R. Merckiego (1915). Badacz ten określił udział opadów w postaci śnieżnej w ogólnej sumie opadów. Opis rozkładu przestrzennego udziału opadów stałych w ogólnej su-

mie opadów w Polsce znajdujemy w pracy L. Bartnickiego (1955), L. Bartnickiego i Z. Wierzbickiego (1962) oraz Z. Wierzbickiego (1959). A. Kosiba (1954) scharakteryzował przestrzenne zróżnicowanie opadów śnieżnych na Śląsku. Charakterystykę warunków śniegowych w Karpatach polskich przedstawił R. Madany (1961) na podstawie danych z lat 1951–1955. J. Moszczyńska (1969) wykazała wpływ krawędzi Wyżyny Łódzkiej na częstość i sumy opadów w postaci stałej.

W Polsce, jak i w całej Europie Środkowej słabo rozpoznana i udokumentowana jest zmienność czasowa opadów śnieżnych. Z tego zakresu badania prowadził R. Twardosz na podstawie serii z Krakowa z lat 1863–2000 (Twardosz, 2003a) oraz Pogórza Karpackiego (Twardosz, 2002–2003, 2003b). M. Laternser i M. Schneebeli (2003) zbadali trendy zmian wieloletnich (1931–1999) liczby dni z opadem śniegu w Alpach Szwajcarskich. Więcej uwagi poświęcono badaniu zmienności i uwarunkowań cyrkulacyjnych występowania silnych opadów śnieżnych, m.in. w Krakowie (Twardosz, 2003c, 2005a), w Austrii i wschodnich Alpach (Spreitzhofer, 1999a, b, 2000), w Stanach Zjednoczonych (Birkeland i Mock, 1966; Goree i Younkin, 1966; Younkin, 1968; Brandes i Spar, 1971; Mote i in., 1997; McGinnis, 2000; Kocin i Uccellini, 2004).

Duży wkład do poznania rozkładu przestrzennego postaci i typów opadów na świecie wniosły badania A. Dai (2001), który zajmował się rozkładem przestrzennym ich występowania w ujęciu globalnym w latach 1975–1997. Rozkład przestrzenny liczby dni z burzą został udokumentowany w publikacji WMO (1956).

Badania wieloletnich zmian opadów śnieżnych najczęściej były prowadzone w górach, ze względu na ich znaczenie w formowaniu się lawin (Fitzharris, 1981; Butler, 1986; Mock i Kay, 1992; Birkeland i Mock, 1996; Spreitzhofer 2000), lub w obszarach położonych w wysokich szerokościach geograficznych (Bromwich, 1988; Suckling i Kimsey, 1988; Przybylak, 2002; Førland i Hansen-Bauer, 2003; Łupikasza, 2007, 2008), czyli tam, gdzie śnieg stanowi dominującą postać opadu, oraz w USA (Harrington i in., 1987; Harrington i Cervený, 1988; Karl i in., 1993; Leathers i in., 1993; Huntington i in., 2004; Kunkel i in., 2007). Wyniki tych badań pokazały, że np. w Arktyce Kanadyjskiej istotnie wzrosły sumy opadów śniegu, nie zaobserwowano natomiast istotnych zmian stosunku opadów śniegu do ogólnych sum opadowych w okresie 1950–1995 (Przybylak, 2002). Spadek udziału opadów śniegu w ogólnych sumach opadów stwierdzono natomiast w Arktyce Norweskiej w okresie od początku XX wieku do 2001 roku (Førland i Hanssen-Bauer, 2003), w Nowej Anglii w okresie 1949–2000 (Huntington i in., 2004) oraz w południowej Kanadzie w okresie 1891–1990 (Karl i in., 1993). P.Y. Groisman i D.R. Easterling (1994) stwierdzili wzrost sum opadów śniegu w okresie 1951–1990 w obszarach Ameryki Północnej na północ od 55°N. W północnej części Kanady zaobserwowano wzrostową tendencję częstości silnych opadów śniegu zimą i na wiosnę, które mają związek z anomaliami makroskalowej cyrkulacji atmosfery (Zhang i in., 2001).

Wyniki najnowszych badań zmian częstości i sum opadów śnieżnych prowadzonych w różnych częściach świata pokazują różną wielkość trendów i kierunków ich zmian, które nie zawsze osiągają istotność statystyczną (Kunkel i in., 2007; Ke i in., 2009). A zatem nie ma prostej zależności zmian opadów śnieżnych od temperatury powietrza.

W dotychczasowych opracowaniach podkreślano istotny wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady śnieżne i pokrywę śnieżną, szczególnie w umiarkowanych szerokościach geograficznych półkuli północnej. Dobrze jest udokumentowany wpływ NAO na opady śnieżne w północno-wschodniej części USA (Hartley, 1996; Hurrell, 1996; Hurrell i van Loon, 1997; Hartley i Keables, 1998; Durkee i in., 2007), ale też w Krakowie (Łupikasa i in., 2010), oraz na liczbę dni z pokrywą śnieżną we wschodniej Europie (Bednorz, 2004) i w Polsce (Falarz, 2007; Bednorz, 2008). Na uwagę zasługują także badania K.E. Kunkela i J.R. Angela (1999) oraz M.C. Serreze'a i in. (1998), dowodzące istnienia związku między opadami śniegu w USA i PNA (Pacific-North American teleconnection pattern) i EP (East Pacific), szczególnie w okresie od listopada do lutego.

Spośród innych typów opadów dużą wagę przywiązuje się do opadów marnych, jako jednego z niebezpiecznych zjawisk meteorologicznych dla gospodarki, a zwłaszcza dla komunikacji. Opracowania z tego zakresu zostały wykonane w odniesieniu do obszaru Rosji (Bezrukova i in., 2006), Stanów Zjednoczonych (Gay i Davis, 1993; Bernstein, 2000; Cortinas, 2000; Rauber i in., 2001; Robbins i Cortinas, 2002; Kocin i Uccellini, 2004; Houston i Changnon, 2007) oraz Arktyki Kanaadyjskiej (Stewart i Isaac, 1999; Roberts i Stewart, 2008).

Innym niebezpiecznym zjawiskiem atmosferycznym są opady burzowe, w tym także burze gradowe. Przykładem opracowań na ten temat w odniesieniu do dużych obszarów są prace S.A. Changnona (2001), A. Dai (2001) oraz E. Morina i in. (2006). W Polsce pionierskie opracowanie o burzach gradowych w b. Królestwie Polskim opublikował J. Sapalski (1852), a w pierwszej monografii klimatu ziem polskich R. Merecki (1915) przedstawił także rozmieszczenie szkód gradowych w b. Królestwie Polskim. Bogata historia obserwacji gradu w Polsce została opublikowana we wcześniejszym opracowaniu autorów (Twardosz i in., 2010b). Wiele opracowań z zakresu występowania gradów wykonano w Europie Południowej (Vinet, 2001; Giaioti i in., 2003; Sioutas i Flocas, 2003; Dimitrova i in., 2009; Sioutas i in., 2009) i Australii (np. Schuster i in., 2005).

Wiele publikacji dotyczyło wyłącznie występowania burz w Polsce (m.in. Stopa, 1962; Bielec-Bąkowska, 2001, 2002; Kolendowicz, 2005; Bielec-Bąkowska i Łupikasa, 2009). Badania występowania opadów burzowych w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne szczegółowo zostały udokumentowane w pracach R. Twardosza (2005b, 2010b).

1.4. Materiał badawczy

1.4.1. Dane opadowe

W badaniach zmian i zmienności klimatu konieczne jest użycie wieloletnich serii obserwacji, które spełniają warunek jednorodności. Do znanych i wyjątkowych miejsc w świecie zalicza się Kraków, który ma wiarygodny i nieprzerwany ciąg ob-

serwacji meteorologicznych od 1 maja 1792 roku. Od założenia stacji, czyli od 1 maja 1792 roku, obserwacje były prowadzone przez wykwalifikowanych obserwatorów; wykonywali je astronomowie, a od lat 50. XX wieku po dziś meteorolodzy, co stanowi gwarancję dużej ich wartości. Ponadto w archiwum stacji zachowały się *metadane*, na podstawie których poznajemy historię badań meteorologicznych nie tylko w Krakowie, ale także dawnej Galicji (Twardosz, 2007b; Twardosz i Cebulska, 2010). Ma to bardzo ważne konsekwencje dla wiarygodności zgromadzonych danych ze względu na możliwość weryfikacji ich jednorodności w odniesieniu m.in. do przyrządów, jednostek pomiarowych, czasu obserwacji itp. (Twardosz, 1997; Twardosz 2005b).

Szczególnie duże znaczenie z punktu widzenia współczesnych zmian klimatu zyskują obserwacje ilościowe i jakościowe opadów prowadzone w Krakowie, które – jak dotąd – nie były w całości opracowane, a są podstawą tej pracy. Jak wykazano we wcześniejszych badaniach (np. Niedźwiedz i in., 2009), wahania opadów w Krakowie dobrze korelują z opadami w innych stacjach we wschodniej i zachodniej części Europy Środkowej. Tak więc uzyskane wyniki badań opadów odnoszą się nie tylko do samego miasta, ale wykraczają poza Polskę południową.

Regionalnym seriom czasowym P. Jones i M. Hulme (1996) przypisują duże znaczenie w badaniach zmienności klimatu. Duża zmienność przestrzenna opadów, a także efekty działania innych czynników komplikują próby wyjaśnienia związku między ociepleniem klimatu a zmianami ogólnej ilości opadów. Dlatego też wskazują się na potrzebę badań opadów śnieżnych (IPCC, 2007).

Obserwacje jakościowe opadów w Krakowie prowadzi się w całym okresie działalności stacji. Chociaż, jak podaje J. Hanik (1972), na liście przyrządów meteorologicznych zamówionych do Obserwatorium był wyszczególniony deszczomierz „...udometr, czyli instrument do mierzenia wilgoci spadłej w deszczach i potrzebnej do utrzymywania roślinności, zapisany z Londynu, ale cena jego nie znana...”, to jednak przyrządu tego nie zakupiono i tym samym pomiarów nie rozpoczęto. Do sierpnia 1849 roku prowadzono tylko obserwacje wizualne występowania opadów. Na podstawie zachowanych dzienników codziennych spostrzeżeń meteorologicznych zebrano informację o wystąpieniu opadu, jego postaci i zjawiskach, które towarzyszyły opadowi. Notowano także inne informacje o opadzie, np. o jego natężeniu (drobny deszcz, silny deszcz, ulewa, burza itd.). Zapisy te były umieszczane w osobnej kolumnie dziennika obserwacyjnego „Stan atmosfery”, a przykład zapisu zilustrowano na rysunku 1.3. Obserwacje opadów w Krakowie prowadzono zgodnie z instrukcją „Prawidła do zachowania w zapisywaniu Obserwacji Meteorologicznych”, spisanej przez J. Śniadeckiego (z zachowaniem oryginalnej pisowni): „Jeżeli w który dzień deszcz lub śnieg padnie, lecz nie w czasie obserwacji pamiętać koniecznie potrzeba, aby go przy zapisywaniu drugiej obserwacji napisać; napisać go zaś należy przy tej obserwacji, po której padał, to jest jeżeli padał przed Południem przy ranniejszej, jeżeli po Południu lub wieczór przy Popołudniowej; jeżeli w nocy padał przy wieczornej, ażeby tym sposobem rozróżnić można dni suche od dni wilgotnych. Jeżeli pada grad lub grzmoty z błyskawicą słyszeć się dażą, te zapisywać należy podług tej samej reguły, która służy na zapisywanie deszczu lub śniegu”. Dzięki tej instrukcji zapisy obserwacji opa-

Nad stroną metodyczną obserwacji opadów w Krakowie czuwali pracownicy Obserwatorium Astronomicznego UJ, przy którym obserwacje te były prowadzone. Szczególne zasługi w tym zakresie należy przypisać prof. Franciszkowi Karlińskiemu oraz dr. Danielowi Wierzbickiemu, którzy obserwacje te prowadzili i je opracowywali. Wyniki badań publikowali w Sprawozdaniach Komisji Fizjograficznej (Haniak, 1972; Twardosz, 2007b).

Na podstawie obserwacji jakościowych i ilościowych opadów w Krakowie utworzono wiarygodną bazę danych obejmującą dobowe sumy opadów od 1863 do 2008 roku oraz informację o postaci i typie opadu zakodowaną zgodnie z klasyfikacją T. Niedźwiedzia, zamieszczoną w tabeli 1.1. Z lat wcześniejszych zgromadzono dane tylko jakościowe z następujących okresów: 01.05.1792–18.05.1794; 01.09.1803–09.08.1804; 01.04.1805–05.10.1805; 01.10.1811–15.12.1821; 01.01.1822–30.09.1823; 01.01.1824–31.12.1844; 01.01.1849–31.12.1855; 01.12.1862–31.12.1862. Informację o postaci opadów weryfikowano z wartością temperatury powietrza, co jest istotne w przypadku występowania opadów śnieżnych i mieszanych. Cała utworzona seria opadowa zachowuje warunek jednorodności pomiarowej. Wcześniejsze badania jednorodności statystycznej tej serii (Twardosz, 2005b) również pokazały, że można uznać ją za homogeniczną, na przyjętym poziomie istotności 0,05.

1.4.2. Typologia układów cyrkulacyjnych według T. Niedźwiedzia

W umiarkowanej strefie geograficznej cyrkulacja atmosferyczna odgrywa istotną rolę w kształtowaniu klimatu, co wynika z częstej zmiany układów barycznych sterujących wymianą mas powietrznych. Do wyjaśnienia przyczyn zmienności poszczególnych elementów klimatu w skali lokalnej najczęściej stosuje się typologię mezoskalową, sporządzoną dla niewielkich obszarów. Do takich typologii cyrkulacji atmosferycznej należy subiektywna typologia T. Niedźwiedzia (1981, 2011) wykonana w odniesieniu do południowej Polski. Wzorowana ona była z pewnymi modyfikacjami na klasyfikacji typów cyrkulacji H.H. Lamba (1972) dla Wysp Brytyjskich. Stosowana jest często do wyjaśnienia zmienności poszczególnych elementów klimatu nie tylko w Polsce Południowej, ale także na obszarach przylegających (np. Niedźwiedź i in., 2009).

W tej pracy do określenia związku występowania opadów atmosferycznych w Krakowie z cyrkulacją atmosferyczną wykorzystano całą dokumentację cyrkulacji zestawioną przez T. Niedźwiedzia (1981, 2011). Obejmuje ona katalog typów cyrkulacji od września 1873 roku do czasów obecnych oraz katalog mas powietrznych i frontów atmosferycznych od 1951 roku, subiektywnie wydzielonych w każdym dniu. Podstawę sporządzenia katalogów stanowiły mapy synoptyczne dolnej Europy z godzin 00 i 12 UTC (ostatnio z godzin 00, 06, 12 i 18 UTC) Niemieckiej Służby Meteorologicznej (Deutsche Wetterdienst). Najważniejszymi elementami wydzielonych typów cyrkulacji są kierunek adwekcji lub jej brak oraz rodzaj układu barycznego. Te 2 elementy cyrkulacji występują w większości znanych klasyfikacji mezoskalowych. T. Niedźwiedź wydzielił łącznie 21 typów cyrkulacji, w tym 16 typów adwek-

cyjnych, do których wprowadził powszechnie stosowane w meteorologii oznaczenia literowe kierunku adwekcji z indeksem „a” do układów antycyklonalnych – Na, NEa, Ea, SEa, Sa, SWa, Wa i NWa oraz z indeksem „c” do układów cyklonalnych – Nc, NEc, Ec, SEc, Sc, SWc, Wc i NWc. Pozostałe 4 typy stanowią sytuacje bezadwekcyjne lub sytuacje o zróżnicowanych kierunkach adwekcji, a więc:

- Ca – sytuacja centralna antycyklonalna, brak adwekcji, centrum wyżu nad południową Polską,
- Ka – klin antycyklonalny, czasem kilka niewyraźnych ośrodków lub rozmyty obszar podwyższonego ciśnienia, oś wału wysokiego ciśnienia,
- Cc – sytuacja centralna cyklonalna, centrum niżu nad południową Polską,
- Bc – bruzda cyklonalna, rozmyty obszar niskiego ciśnienia lub oś bruzdy niżowej z różnymi kierunkami adwekcji i systemem frontów oddzielających różne masy powietrzne.

Symbolem X (numer kodowy 21) zostały oznaczone siodła baryczne i sytuacje niedające się zaklasyfikować.

Wydzielone przez T. Niedźwiedzia typy mas powietrznych nawiązują do klasyfikacji powszechnie przyjętej w służbie meteorologicznej (Bołaszewska i Reutt, 1962; *Glossary of Meteorology*, 2000; Niedźwiedź, 2003), według obszaru źródłowego masy (tzw. geograficzna klasyfikacja mas powietrznych) oraz jej cech termicznych i wilgotnościowych (m – morskie, k – kontynentalne) opartej na klasyfikacji T. Bergerona (1928). Autor wyróżnił 6 typów mas powietrznych:

- arktyczna – PA,
- polarna morska świeża – PPM,
- polarna morska stara – PPms,
- polarna morska ciepła – PPmc,
- polarna kontynentalna – PPK,
- zwrotnikowa – PZ.

Osobno wydzielił przypadki, kiedy pojawił się więcej niż jeden typ masy w ciągu doby. W klasyfikacji frontów atmosferycznych nad południową Polską T. Niedźwiedź uwzględnił 4 rodzaje frontów:

- ciepły,
- chłodny,
- okluzji,
- stacjonarny.

Ponadto Autor wydzielił dni, w których przechodziły przynajmniej 2 różne rodzaje frontów (różne fronty) oraz dni bezfrontowe. W przypadku frontu okluzji T. Niedźwiedź nie wprowadził szczegółowego rozróżnienia co do charakteru okluzji.

1.5. Metody badań

Na podstawie materiału wyjściowego, którym były dobowe sumy opadów ($\geq 0,1$ mm) oraz informacje o ich postaci i typie, wyznaczono: liczbę dni z opadem i sumy opadów wszystkich uwzględnionych kategorii zestawionych w tabeli 1.1. Są to opady:

- **ciekłe** (mżawka i deszcz, kody: 1, 5, 8, 9); do sum opadów ciekłych wliczono opady gradu (kod 5) i opady z burz gradowych (kod 9), co wynika z faktu, że opad gradu trwa zwykle krótko – od kilku do kilkunastu minut, zaś większa część opadu dobowego pochodzi z deszczu ulewnego, a przy obecnych technikach pomiarowych nie ma możliwości wyodrębnienia ilości opadu, jaki pochodzi z opadu gradu,
- **śniegu** (śnieg i różne jego postacie, kody: 3, 7),
- **mieszane** (kod 2),
- **burzowe** (kody: 7, 8, 9) i **gradu** (kody: 5 i 9),
- **marznące**; w przypadku tego typu opadów najbardziej wiarygodne dane użytkano od 1920 roku.

W analizie opadów w II części pracy pominięto opady zmierzone w deszczomierzu, a pochodzące z osadu lub mgły, tzw. opady poziome (kod 4), ponieważ w bazie danych nie było możliwe dokonanie rozróżnienia, czy pochodziły one z rosy czy ze szronu.

Badano zmienność roczną i wieloletnią liczby dni i sum wyróżnionych postaci i typów opadów oraz ich udział w ogólnej sumie opadów w podziale na miesiące, pory roku i w całym roku. Charakterystyki ilościowe opadów wraz z trendami zmian obliczono w odniesieniu do lat z pomiarów instrumentalnych 1863–2008, a więc okresu, z którego sumy dobowe opadów zostały uznane za jednorodne. Do zobrazowania przebiegu wieloletniego częstości opadów wykorzystano wcześniejsze obserwacje opadów, prowadzone od początku istnienia stacji. Z uwagi jednak na znaczne luki w danych w początkowym okresie w pracy opisano zmienność opadów od 1812 do 1855 roku, z wyjątkiem lat 1845–1848. Charakterystykę opadów przedstawiono nie tylko w skali sekularnej, ale także w odniesieniu do okresu współczesnego ocieplenia 1989–2008. Według IPCC (2007) w tym okresie wystąpiło 12 najcieplejszych lat w całym okresie pomiarów instrumentalnych temperatury globalnej, tj. od 1850 roku.

Przebieg wieloletni opadów wygładzono 11-letnim filtrem Gaussa (Schönwiese, 2000). Wielkość i kierunek zmian opadów określono na podstawie analizy regresji liniowej oraz powiązano je ze zmianami temperatury powietrza.

Wyznaczono kwantyle sum opadów na podstawie rozkładu empirycznego serii opadów na 4 poziomach prawdopodobieństwa: 1, 10, 50 i 90%. Błędy standardowe (niepewności oszacowania) kwantyli obliczano, opierając się na fakcie, że liczba obserwacji definiująca kwantyl podlega rozkładowi dwumianowemu.

Wpływ cyrkulacji na opady rozpatrywano z punktu widzenia typu cyrkulacji, masy powietrznej i frontu atmosferycznego, a z uwagi na sezonowość procesów cyrkulacyjnych tę część badań wykonano w podziale na pory roku. Ponadto określono wpływ 3 mezoskalowych wskaźników cyrkulacji atmosferycznej oraz wskaźnika cyrkulacji makroskalowej NAO na opady w Krakowie. Wskaźnik Oscy-

lacji Północnoatlantyckiej (NAO – North Atlantic Oscillation) został zdefiniowany przez J.W. Hurrella (Hurrell, 1995, 1996; Hurrell i van Loon, 1997) jako różnica standaryzowanych wartości ciśnienia atmosferycznego między Wyżem Azorskim i Niżem Islandzkim. Różnice dodatnie świadczą o dużej intensywności przepływu zachodniego mas powietrza z Oceanu Atlantyckiego nad Europę, dlatego też wskaźnik ten jest często stosowany przy badaniu wpływu makroskalowej cyrkulacji atmosfery na klimat Europy. W niniejszym opracowaniu wykorzystano miesięczne wartości wskaźnika NAO z lat 1821–2008, obliczone przez P.D. Jonesa i in. (1997) na podstawie ciśnienia atmosferycznego w Gibraltarze i Stykkisholmur na Islandii. Wartości tego wskaźnika z ostatnich lat zostały uaktualnione przez T.J. Osborna (2006) i są dostępne na stronie internetowej: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao/>.

Wskaźniki regionalne: W, S i C zostały wyliczone z rozdzielczością miesięczną dla Polski Południowej przez T. Niedźwiedzia (2000, 2006) na podstawie częstości określonych typów cyrkulacji w latach 1874–2008. Te proste wskaźniki są modyfikacją wskaźników PMSC wyznaczonych przez P. Murraya i R.P. Lewisa (1966) dla Wielkiej Brytanii. Powstały one przez zsumowanie punktacji wyznaczonej dla poszczególnych typów cyrkulacji.

Wskaźnik cyrkulacji strefowej W został wyznaczony przez zsumowanie w każdym miesiącu następujących punktów dla określonych typów cyrkulacji:

- +2 dla typów Wc i Wa oraz +1 dla typów SWc, SWa, NWc, NWa,
- 2 dla typów Ec i Ea oraz –1 dla typów SEc, SEa, NEc, NEa.

Wysokie wartości dodatnie wskaźnika W informują o intensywnej cyrkulacji zachodniej, wartości ujemne świadczą natomiast o tym, że w danym miesiącu dominowała cyrkulacja ze wschodu.

Wskaźnik cyrkulacji południkowej S został wyznaczony przez zsumowanie w każdym miesiącu następujących punktów dla określonych typów cyrkulacji:

- +2 dla typów Sc i Sa oraz +1 dla typów SWc, SWa, SEc, SEa,
- 2 dla typów Nc i Na oraz –1 dla typów NEc, NEa, NWc, NWa.

Wysokie wartości dodatnie wskaźnika S informują o intensywnej cyrkulacji południowej, wartości ujemne świadczą natomiast o tym, że w danym miesiącu dominowała cyrkulacja z północy.

Wskaźnik cykloniczności C został wyznaczony przez zsumowanie w każdym miesiącu następujących punktów dla określonych typów cyrkulacji:

- +2 dla typów Cc i Bc oraz +1 dla pozostałych typów cyklonalnych (c),
- 2 dla typów Ca i Ka oraz –1 dla pozostałych typów antycyklonalnych (a).

Wysokie wartości dodatnie wskaźnika C informują o przeważającej obecności układów niżowych, wartości ujemne świadczą natomiast o tym, że w danym miesiącu dominowały układy wysokiego ciśnienia.

Sumę uzyskanych punktów dla każdego wskaźnika w miesiącu podzielono przez podwojoną liczbę dni w miesiącu. W ten sposób wszystkie 3 rozpatrywane regionalne wskaźniki cyrkulacji: W, S i C wyrażono w wartościach względnych od –100 do 100%. Wartość 100% dowolnego wskaźnika oznacza, że w danym miesiącu wystąpiły wyłącznie typy cyrkulacji, którym przypisano +2 punkty, a –100% oznacza wyłącznie typy z punktami –2.

Wpływ układów cyrkulacyjnych na opady określono prawdopodobieństwem warunkowym wystąpienia opadu, wielkością średnich dobowych sum opadów i wartości maksymalnych (a także silnych opadów) w danym typie/masie/froncie. Charakterystyki opadów wyznaczono także oddzielnie we wszystkich dniach frontowych i bezfrontowych (opady wewnątrzmasowe). Do określenia statystycznego związku opadów ze wskaźnikami cyrkulacji atmosferycznej i NAO zastosowano współczynnik korelacji Pearsona (Schönwiese, 2000). Średnie dobowe sumy opadów obliczono tylko z dni opadowych ($\geq 0,1$ mm). Częstość określonego typu opadu obliczano w procentach w stosunku do liczby dni z wszystkimi typami opadów $\geq 0,1$ mm.

Prawdopodobieństwo warunkowe w postaci ogólnej wyraża prawdopodobieństwo zajścia określonego zdarzenia losowego pod warunkiem zajścia innego zdarzenia losowego. W pracy obliczono prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia określonego typu opadu w danym typie cyrkulacji w stosunku do liczby dni z tym typem cyrkulacji. Przy średnich wartościach liczby dni i sum opadów, a także prawdopodobieństwie wystąpienia opadów podano przedziały ufności średniej (lub błędy standardowe średniej), które obliczono jako iloraz odchylenia standardowego przez pierwiastek z liczebności próby.

W związku z tym, że opady dobowe cechują się silną asymetrią rozkładu prawdopodobieństwa, co wynika z ich z oczywistej cechy, że nie przyjmują one wartości ujemnych, a w zasadzie nawet wartości zero, zastosowano transformację logarytmiczną. Pozwoliło to zminimalizować skośność rozkładu i dało możliwość zastosowania testu *t* Studenta do oceny istotności różnic średnich sum opadów. Stosując funkcję TEST.T w programie Excel do weryfikacji hipotezy o równości średnich, przyjęto, że oba parametry funkcji mają wartość 2 (Twardosz i Walanus, 2011).

Charakterystyki opadów ciekłych wyznaczono w miesiącach, porach roku i całym roku. Opady śnieżne i mieszane rozpatrywano tylko w miesiącach tzw. okresu śnieżnego, czyli potencjalnym okresie ich występowania, tj. od października do maja oraz w całej zimie i porach przejściowych. Ponadto rozpatrzono datę pierwszych oraz ostatnich opadów śniegu oraz długość sezonu śnieżnego, czyli liczbę dni między pierwszym a ostatnim opadem śniegu. Opady burzowe badano w półroczu ciepłym (kwiecień–wrzesień) oraz chłodnym (październik–marzec), a także w poszczególnych miesiącach i całym okresie letnim.

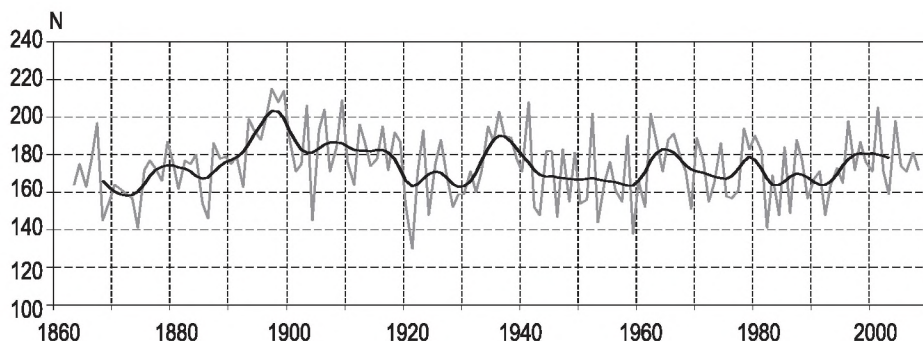
Na szczególną uwagę zasługują opady marznące, powodujące występowanie gołoledzi. W opracowaniu uwzględniono wszystkie przypadki występowania marznącego (przechłodzonego) deszczu lub mżawki, jak też opad ziaren lodowych. Charakterystyki tych opadów opracowano tylko w zakresie półrocza chłodnego (X–III).

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W KRAKOWIE

2.1. Liczba dni z opadem

Opady w Krakowie występują średnio w 174 dniach w roku, co stanowi 48% wszystkich dni (tab. 2.1). Zakres wahań liczby dni opadowych w rozpatrywanym okresie 146 lat jest znaczny – od 130 w roku 1921 do 215 dni w roku 1897 (rys. 2.1).

W przebiegu rocznym liczba dni z opadem ($\geq 0,1$ mm) nie wykazuje dużej zmienności. Współczynnik zmienności zmienia się od 25% w listopadzie do 33% w lutym. Ogólnie, nieznacznie większa częstość opadów przypada w zimie, a mniejsza w porach przejściowych i w lecie. Zwiększonej częstości opadów w zimie sprzyja przewaga cyrkulacji zachodniej przynoszącej wilgotne masy powietrzne znad Atlantyku. Najmniej dni opadowych – średnio 12,7 – występuje we wrześniu, czyli w okresie z przeważającą cyrkulacją antycyklonalną, w której dywergencja prądów powietrza nie sprzyja występowaniu opadów. W październiku ujawnia się największa zmienność liczby dni z opadem. W tym miesiącu zdarzył się brak opadów w 1951 roku, a w roku 1936 było ich aż 27. Miesiącem o najczęstszych opadach (30 dni) był styczeń 1963 roku.



Rys. 2.1. Przebieg wieloletni rocznej liczby dni z opadem (N); wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 2.1. Variation of the annual number of days with precipitation (N); values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)

Tabela 2.1. Liczba dni z opadem o różnej wielkości sumy dobowej, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności (1863–2008)

Table 2.1. Number of days with different precipitation daily totals, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard deviation, V – variability coefficient (1863–2008)

Okres Period	$\geq 0,1$ mm					≥ 10 mm		≥ 30 mm	
	Śr./Av.	Min.	Max.	σ	V (%)	Śr./Av.	Max.	Śr./Av.	Max.
I	$15,3 \pm 0,4$	3	30	4,6	29	$0,4 \pm 0,1$	3	–	–
II	$13,8 \pm 0,4$	1	24	4,6	33	$0,3 \pm 0,1$	4	–	–
III	$14,2 \pm 0,4$	3	25	4,6	32	$0,6 \pm 0,1$	4	–	–
IV	$13,9 \pm 0,3$	4	23	3,9	27	$1,0 \pm 0,1$	5	$0,03 \pm 0,02$	1
V	$14,7 \pm 0,3$	6	26	4,0	27	$2,1 \pm 0,1$	6	$0,2 \pm 0,1$	3
VI	$15,1 \pm 0,3$	3	26	4,1	26	$2,8 \pm 0,1$	7	$0,4 \pm 0,1$	3
VII	$14,9 \pm 0,4$	4	26	4,3	28	$3,0 \pm 0,2$	11	$0,5 \pm 0,1$	4
VIII	$13,9 \pm 0,3$	5	23	3,8	27	$2,8 \pm 0,1$	9	$0,4 \pm 0,1$	3
IX	$12,7 \pm 0,3$	5	23	4,1	32	$1,7 \pm 0,1$	6	$0,2 \pm 0,1$	3
X	$14,3 \pm 0,4$	0	27	5,4	37	$1,4 \pm 0,1$	5	$0,05 \pm 0,01$	1
XI	$15,6 \pm 0,3$	4	24	3,9	25	$0,8 \pm 0,1$	3	$0,01 \pm 0,01$	1
XII	$15,9 \pm 0,4$	4	25	4,4	27	$0,5 \pm 0,1$	3	–	–
III–V	$42,8 \pm 0,6$	25	71	7,3	17	$3,7 \pm 0,2$	9	$0,3 \pm 0,1$	3
VI–VIII	$43,9 \pm 0,6$	22	64	7,8	17	$8,6 \pm 0,3$	19	$1,2 \pm 0,1$	5
IX–XI	$42,6 \pm 0,7$	21	64	8,6	20	$3,9 \pm 0,2$	11	$0,2 \pm 0,1$	4
XII–II	$45,0 \pm 0,7$	20	67	8,3	18	$1,2 \pm 0,1$	5	–	
I–XII	$174,2 \pm 1,5$	130	215	17,6	10	$17,5 \pm 0,4$	27	$1,7 \pm 0,1$	6

Większość opadów w Krakowie, jak i na przeważającej części obszaru Polski, to przede wszystkim opady słabe i umiarkowane, których suma dobową nie przekracza 5 mm (Twardosz, 2007a). Opady silne, a więc takie, których suma jest równa lub większa od 10 mm, pojawiają się średnio przez 17,5 dnia w roku, co stanowi 10% wszystkich dni opadowych (tab. 2.3). Choć zdarzają się przez cały rok, to jednak występują głównie latem. Wykazują się dużą zmiennością z roku na rok; najmniej ich było w roku 1993 – 7, a najwięcej – 27 – w latach 1937, 1960 i 1966. W lipcu 1903 i 1997 roku było ich aż po 11. Opady bardzo silne, czyli opady o sumie równej 30 mm lub większej, występują rzadko. Jest ich dziesięciokrotnie mniej niż opadów silnych, tzn. dni z takim opadem stanowią tylko 1% wszystkich dni opadowych. Pojawiają się przede wszystkim od maja do listopada.

Dni z opadem deszczu i mżawki (kod 1) dominują, stanowiąc 58,1% dni opadowych (tab. 2.2). Latem opady występują wyłącznie w postaci ciekłej (kody 1 i 8), a w zimie ich udział zmniejsza się do 31,7% dni. W porach przejściowych, a tym bardziej w zimie, pojawiają się ponadto opady śnieżne i mieszane (deszczowo-śnieżne). Na trzecim miejscu pod względem częstości plasują się opady burzowe (kody: 7, 8 i 9),

Tabela 2.2. Średnia liczba dni z opadem według ich postaci i typów, dni z burzą oraz błąd standardowy średniej (1863–2008)

Table 2.2. Average number of days with different precipitation types and forms, days with a thunderstorm and standard error of the mean (1863–2008)

Kod* Code*	Miesiące / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 ±	4,2 0,3	3,9 0,3	6,2 0,3	9,9 0,3	10,0 0,3	10,0 0,3	9,2 0,3	9,5 0,3	10,9 0,3	11,9 0,4	9,5 0,3	6,0 0,3
2 ±	2,9 0,2	2,7 0,2	3,0 0,2	1,7 0,1	0,3 0,1	0,01 0,01	– –	– –	0,05 0,02	0,7 0,1	2,4 0,2	3,1 0,2
3 ±	7,8 0,4	6,8 0,4	4,7 0,2	0,9 0,1	0,08 0,03	– –	– –	– –	0,01 0,01	0,2 0,1	2,8 0,2	6,2 0,3
4 ±	0,18 0,04	0,14 0,05	0,11 0,04	0,04 0,02	0,03 0,01	0,01 0,01	0,04 0,02	0,08 0,03	0,4 0,1	1,1 0,2	0,8 0,1	0,6 0,1
5 ±	– –	– –	– –	0,16 0,04	0,15 0,04	0,08 0,02	0,01 0,01	0,03 0,01	0,07 0,02	– –	– –	– –
6 ±	0,01 0,01	– –	0,01 0,01	0,15 0,03	0,60 0,06	0,83 0,08	0,62 0,07	0,51 0,07	0,20 0,04	0,02 0,01	0,01 0,01	– –
7 ±	0,10 0,03	0,10 0,04	0,10 0,03	0,05 0,02	0,01 0,01	– –	– –	– –	– –	– –	0,04 0,02	0,03 0,01
8 ±	0,05 0,02	0,04 0,02	0,14 0,03	1,0 0,1	3,7 0,2	4,5 0,2	5,4 0,2	4,1 0,2	1,2 0,1	0,23 0,04	0,03 0,02	0,03 0,01
9 ±	– –	– –	– –	0,14 0,03	0,44 0,06	0,45 0,06	0,27 0,04	0,18 0,04	0,09 0,03	– –	– –	– –

* – objaśnienia w tabeli 1.1; explanations in Table 1.1

Kod* Code*	Okres / Period				
	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II	I–XII
1 ±	26,1 0,6	28,7 0,6	32,3 0,6	14,1 0,5	101,2 1,2
2 ±	5,0 0,2	0,01 0,01	3,1 0,2	8,7 0,3	16,8 0,4
3 ±	5,7 0,3	– –	3,1 0,2	20,9 0,7	29,6 0,8
4 ±	0,18 0,04	0,14 0,03	2,4 0,3	0,9 0,1	3,6 0,4
5 ±	0,3 0,1	0,12 0,03	0,16 0,03	– –	0,6 0,1
6 ±	0,7 0,1	2,0 0,1	0,23 0,04	0,01 0,01	3,0 0,2
7 ±	0,16 0,04	– –	0,04 0,02	0,2 0,1	0,4 0,1
8 ±	4,8 0,2	14,0 0,3	1,5 0,1	0,12 0,03	20,4 0,4
9 ±	0,6 0,1	0,9 0,1	0,12 0,03	– –	1,6 0,1

* – objaśnienia w tabeli 1.1; explanations in Table 1.1

które stanowią ważną grupę, ze względu na duże ich natężenie. Pojawiają się przez cały rok, jednak największe prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest w porze letniej. Podczas 32,5% dni z opadem w lecie występuje burza. Nieco mniej – 9,6% dni – stanowią te z opadem mieszanym (kod 2). Występują one głównie w zimie i w porach przejściowych. Opady gradu zdarzają się bardzo rzadko i tylko od kwietnia do września. W miesiącach chłodnych czasami są notowane przez obserwatorów, są one jednak prawdopodobnie mylone z krupą twardą. W związku z tym w bazie danych uwzględniono tylko grady z okresu od kwietnia do września.

W przebiegu wieloletnim rocznej liczby dni z opadem nie stwierdzono istotnego trendu zmian (tab. 2.3), trendy stwierdzono natomiast w miesiącach i porach roku. I tak, wzrost liczby dni z opadem występuje w miesiącach zimowych i całej zimie, spadek zaś w lecie i jesieni oraz sierpniu i październiku (tab. 2.3). W przebiegu wieloletnim rocznej liczby dni z opadem można natomiast zaobserwować fluktuacje. Wyraźnie zaznaczają się okresy z większą częstością opadów: od ostatniego dziesięciolecia XIX wieku do około roku 1920, lata 30. i 60. XX wieku oraz przełom XX i XXI wieku.

Table 2.3. Współczynniki trendu liczby dni z opadem opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 2.3. Coefficient of trend of the number of days with precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/100 lat) Regression coefficient (days/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,046	+2,3 ± 0,9	0,0089	**
II	0,042	+2,2 ± 0,9	0,013	*
III	0,003	+0,6 ± 0,9	0,52	–
IV	0,004	–0,6 ± 0,8	0,45	–
V	0,006	–0,7 ± 0,8	0,35	–
VI	0,02	–1,3 ± 0,8	0,09	–
VII	0,00	–0,03 ± 0,8	0,97	–
VIII	0,049	–1,9 ± 0,7	0,0073	**
IX	0,02	–1,2 ± 0,8	0,13	–
X	0,074	–3,4 ± 1,0	0,0009	***
XI	0,002	+0,5 ± 0,8	0,55	–
XII	0,027	+1,7 ± 0,9	0,045	*
III–V	0,002	–0,7 ± 1,4	0,62	–
VI–VIII	0,032	–3,4 ± 1,5	0,029	*
IX–XI	0,042	–4,1 ± 1,6	0,013	*
XII–II	0,104	+6,4 ± 1,6	0,00007	***
I–XII	0,002	–1,9 ± 3,4	0,57	–

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

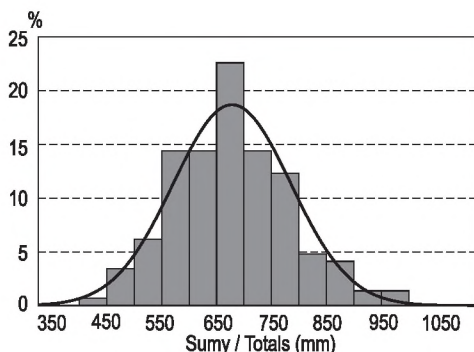
2.2. Sumy opadów

W przyjętym do badań okresie 1863–2008 średnia suma roczna opadów w Krakowie wyniosła 676 mm, a sumy w poszczególnych latach najczęściej osiągały wartości 650–700 mm (rys. 2.2, tab. 2.4). Opady w Krakowie są większe o około 15% od średniego opadu obszarowego w Polsce – 590 mm (Kozuchowski i Żmudzka, 2003). Większe opady w tej części Polski są wynikiem oddziaływania rzeźby terenu i cyrkulacji atmosferycznej, co zostało już dobrze udokumentowane we wcześniejszych opracowaniach (np. Twardosz, 2005b).

Znaczący jest zakres wahań sum rocznych, który wynosi 551,5 mm; najniższa suma 448,4 mm (66% średniej) wystąpiła w 1993 roku, a najwyższa suma 999,9 mm (148% średniej) w 1912 roku (rys. 2.3). W roku 2010, który nie został objęty badaniem w tej pracy, opady w Krakowie i innych częściach Polski były niezwykle wysokie; suma roczna wyniosła aż 1126 mm. Rozkład częstości sum rocznych opadów można aproksymować krzywą rozkładu normalnego (rys. 2.2), co oznacza, że prawdopodobieństwo pojawienia się sumy rocznej mniejszej lub większej od średniej jest podobne.

W przebiegu rocznym opadów wyraźnie zaznacza się maksimum opadów w lipcu, a minimum w lutym (tab. 2.4). Ilość opadów w lecie jest 3 razy większa niż w zimie, co jest przejawem dużego stopnia kontynentalizmu pluwialnego w Krakowie. Opady od czerwca do sierpnia wynoszą aż 41% rocznej sumy.

Największa zmienność opadów miesięcznych jest w październiku – 63% (tab. 2.4). Decydują o tym głównie uwarunkowania cyrkulacyjne. Na przykład w październiku 1951 roku na skutek kilkunastodniowego utrzymywania się sytuacji antycyklonalnych nad znaczną częścią Europy (Cebulska i Twardosz, 2010) opady w Krakowie oraz w wielu innych miejscowościach w Polsce w ogóle nie wystąpiły.



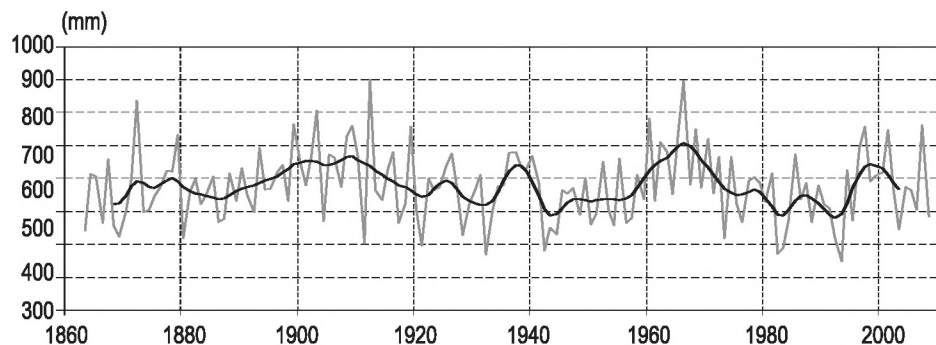
Rys. 2.2. Częstość (%) rocznych sum opadów atmosferycznych (1863–2008) wraz z dopasowaną krzywą rozkładu normalnego

Fig. 2.2. Frequency (%) of annual precipitation totals (1863–2008); a normal distribution is fitted to the histogram

Tabela 2.4. Sumy opadów, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności (1863–2008)

Table 2.4. Precipitation totals, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard deviations, V – variability coefficient (1863–2008)

Okres Period	Suma / Totals (mm)			σ (mm)	V (%)
	Śr./ Av.	Min.	Max.		
I	32,4 ± 1,4	3,8	89,8	17	52
II	29,4 ± 1,4	2,2	100,6	17	57
III	35,5 ± 1,6	0,1	104,8	19	53
IV	46,2 ± 2,1	7,0	148,6	25	55
V	72,3 ± 3,3	10,3	230,3	40	55
VI	90,8 ± 3,5	9,5	250,4	42	46
VII	96,9 ± 4,3	19,1	313,1	52	54
VIII	86,7 ± 3,4	16,5	216,5	41	47
IX	59,8 ± 2,9	9,3	199,3	35	59
X	49,1 ± 2,6	0,0	136,8	31	63
XI	41,1 ± 1,5	2,0	86,1	18	44
XII	36,1 ± 1,5	3,5	82,9	17	48
III–V	153,9 ± 4,3	48,1	356,6	52	34
VI–VIII	274,4 ± 6,8	97,5	537,0	82	29
IX–XI	150,1 ± 4,4	44,5	335,6	54	36
XII–II	97,9 ± 2,5	45,0	172,1	29	30
I–XII	676,4 ± 8,8	448,4	999,8	107	16



Rys. 2.3. Przebieg wieloletni rocznych sum opadów; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

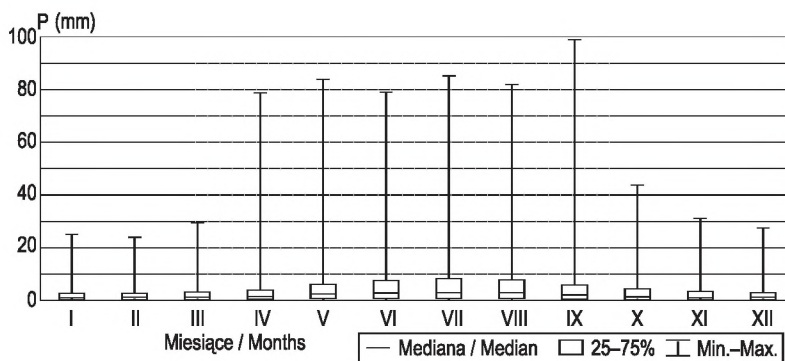
Fig. 2.3. Variation of annual precipitation totals; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)

Największe odchylenie dodatnie sum miesięcznych występuje w lipcu (tab. 2.4); najniższa suma opadu osiągnęła zaledwie 20% średniej wieloletniej (19,1 mm w roku 1928), a najwyższa suma odpowiednio 326% (313,1 mm w roku 1903). Wielkość odchylenia jest większa w krótszych okresach (np. miesięcznych) niż dłuższych (np. rok) (Twardosz, 2007a).

We wszystkich miesiącach zdarzały się bardzo wydajne opady dobowe, nawet w zimie ponad 20 mm (rys. 2.4). W kwietniu, maju i wrześniu maksymalne 24-godzinne opady przekroczyły nawet średnie wieloletnie miesięczne sumy w tych miesiącach. Absolutny maksymalny dobowy opad (99 mm) pojawił się w czasie burzy 9 września 1963 roku. Wysokość tego opadu jest równoważna 168% średniej sumy we wrześniu oraz 15% średniej sumy rocznej opadów w Krakowie.

Spośród wydzielonych postaci i typów opadów największy wkład do rocznej sumy opadów mają opady deszczu i mżawki (kod 1) i opady burzowe (tab. 2.5). W roku ich łączny udział wynosi prawie 80%, a latem 100%. Największa suma opadów deszczu z burzą (kod 8) występuje w lipcu, a burz gradowych w czerwcu (kod 9).

W przebiegu wieloletnim sum opadów rocznych nie obserwuje się trendu zmian istotnego statystycznie (tab. 2.6), bardzo wyraźne są natomiast okresy z nadmiarem i niedoborem opadów (rys. 2.3), które nawiązują do przebiegu liczby dni z opadem (rys. 2.1). Taki nietrwały charakter tendencji opadowych jest cechą zmienności czasowej opadów, na którą wskazał m.in. K. Kożuchowski (2004). Utrzymujący się trend rosnący opadów od końca XX wieku zaznacza się także na większym obszarze Europy Środkowej (Niedźwiedź i in., 2009). Istotne statystycznie zmiany występują jedynie w opadach całej zimy i styczniu; są to zmiany pozytywne. Trend dodatni zaznacza się również w sumach opadów w lutym, jest on jednak istotny statystycznie na poziomie 10%. Rosnący trend opadów w zimie zaznacza się w wielu miejscach Europy, zwłaszcza jej części północnej (rys. 2.5).



Rys. 2.4. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów (1863–2008)

Fig. 2.4. Statistical characteristics of daily precipitation totals (1863–2008)

Tabela 2.5. Średnie sumy opadów (mm) według postaci i typów opadów oraz ich błąd standardowy (1863–2008)

Table 2.5. Average totals (mm) of precipitation types and their standard error (1863–2008)

Okres Period	Kody / Code*						
	1	2	3	5	7	8	9
I	9,4 ± 0,8	9,7 ± 0,79	12,8 ± 0,8	–	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,2	–
II	8,2 ± 0,8	8,9 ± 0,7	11,6 ± 0,9	–	0,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1	–
III	14,3 ± 0,9	11,5 ± 0,9	8,3 ± 0,8	–	0,3 ± 0,1	0,9 ± 0,3	–
IV	30,4 ± 1,7	7,6 ± 1,0	1,6 ± 0,3	0,5 ± 0,2	0,3 ± 0,2	4,6 ± 0,6	1,1 ± 0,3
V	42,1 ± 2,4	1,3 ± 0,3	0,08 ± 0,04	0,3 ± 0,1	0,2 ± 0,2	22,4 ± 1,5	5,9 ± 1,3
VI	48,4 ± 2,8	0,12 ± 0,09	–	0,3 ± 0,1	–	34,9 ± 2,0	7,1 ± 1,3
VII	45,3 ± 3,0	–	–	0,1 ± 0,1	–	46,5 ± 2,4	5,0 ± 0,9
VIII	45,5 ± 2,5	–	–	0,1 ± 0,1	–	37,9 ± 2,2	3,2 ± 0,8
IX	47,8 ± 2,8	0,2 ± 0,1	–	0,2 ± 0,1	–	10,1 ± 1,1	1,4 ± 0,7
X	42,3 ± 2,4	3,5 ± 0,6	0,9 ± 0,3	0,2 ± 0,1	–	1,8 ± 0,4	0,3 ± 0,2
XI	24,7 ± 1,3	10,0 ± 0,9	6,0 ± 0,7	–	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	–
XII	13,7 ± 1,0	10,3 ± 0,8	11,7 ± 0,1	–	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	–
III–V	86,7 ± 3,4	20,5 ± 1,3	10,0 ± 0,8	1,0 ± 0,2	0,8 ± 0,3	27,9 ± 1,6	7,1 ± 1,4
VI–VIII	139,3 ± 5,2	0,1 ± 0,1	–	0,4 ± 0,1	–	119,3 ± 3,7	15,3 ± 1,7
IX–XI	115,0 ± 3,8	13,8 ± 1,0	6,9 ± 0,8	0,5 ± 0,1	0,1 ± 0,1	12,1 ± 1,1	1,8 ± 0,8
XII–II	31,2 ± 1,6	28,9 ± 1,4	36,4 ± 1,7		1,1 ± 0,3	0,6 ± 0,2	–
I–XII	372,0 ± 6,9	63,4 ± 2,2	53,1 ± 2,2	1,9 ± 0,3	1,8 ± 0,4	160,0 ± 4,2	24,3 ± 2,4

*– objaśnienia w tabeli 1.1; explanations in Table 1.1

Tabela 2.6. Współczynniki trendu sum opadów opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 2.6. Coefficient of trend of precipitation totals as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/100 lat) Regression coefficient (mm/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,070	+10,5 ± 3,2	0,0012	**
II	0,02	+5,5 ± 3,2	0,09	–
III	0,02	+1,8 ± 3,7	0,62	–
IV	0,003	+2,2 ± 4,9	0,66	–
V	0,0002	–1,5 ± 7,8	0,85	–
VI	0,001	–3,2 ± 8,3	0,70	–
VII	0,002	–5,9 ± 10,2	0,55	–
VIII	0,010	–9,8 ± 8,0	0,22	–
IX	0,00003	+0,4 ± 6,9	0,94	–
X	0,01	–8,7 ± 6,0	0,15	–
XI	0,002	+1,8 ± 3,5	0,60	–

XII	0,0002	$-0,5 \pm 3,4$	0,86	–
III–V	0,0004	$+2,5 \pm 10,3$	0,80	–
VI–VIII	0,01	$-18,9 \pm 16,0$	0,23	–
IX–XI	0,003	$-6,4 \pm 10,5$	0,54	–
XII–II	0,05	$+15,4 \pm 5,6$	0,007	**
I–XII	0,0008	$-7,3 \pm 21,0$	0,72	–

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

3. CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA W POLSCE POŁUDNIOWEJ

3.1. Typy cyrkulacji

Rozpatrzono częstość typów cyrkulacji atmosferycznej w południowej Polsce w porach roku i w całym roku (tab. 3.1). W przyjętym do badań okresie 1874–2008 częściej występowały typy cyrkulacji antycyklonalnej niż cyklonalnej. Tylko wiosną nieco częstsze były typy cyrkulacji cyklonalnej, chociaż ze statystycznego punktu widzenia nie jest to istotna różnica w średniej częstości między oboma typami cyrkulacji. W jesieni przewaga typów antycyklonalnych jest znacząca (60% dni); często się zdarzają sytuacje z długotrwałymi wyżami „pięknej pogody” lub „zgniłymi wyżami”. W tej porze roku, podobnie jak w lecie, największy udział w ogólnej częstości mają typy cyrkulacji bezadwekcyjne. W zimie i wiosną natomiast wzrasta częstość typów adwekcyjnych, co skutkuje większą zmiennością warunków pogodowych w południowej Polsce.

Wiosną występuje największa zmienność typów cyrkulacji; różnice między częstością typów adwekcyjnych są najmniejsze, co oznacza, że nie ma jednego dominującego kierunku napływu mas powietrznych. W pozostałych porach roku zaznacza się przewaga cyrkulacji z zachodu, zwłaszcza w zimie.

Spośród 21 rozpatrywanych typów cyrkulacji największą częstość w roku miał typ Ka – 12%. W porach roku również przeważał ten typ cyrkulacji, z wyjątkiem zimy. W tej porze roku przeważała cyrkulacja antycyklonalna z zachodu – 14%. Oprócz typów cyrkulacji zachodniej – Wa i Wc – z dużą częstością występowała także bruzda cyklonalna; wiosną i latem ponad 10% dni. Wymienione najczęstsze typy cyrkulacji – Ka, Wa, Wc i Bc – osiągały łącznie częstość 42% w roku. W porach roku ich częstość wahała się od 36% wiosną do 49% latem. Pozostałe typy cyrkulacji występowały znacznie rzadziej i osiągały często podobną frekwencję. Na uwagę zasługuje wyraźna sezonowość występowania niektórych typów cyrkulacji, np. zwiększona częstość typów Nc i NEc oraz Cc i Bc w okresie wiosny i lata, a w jesieni typów Sa i SWa. Do najrzadziej występujących typów cyrkulacji w południowej Polsce, bez względu na porę roku, należą centrum niżu – Cc.

Tabela 3.1. Częstość (%) typów cyrkulacji w południowej Polsce (1874–2008) i jej błąd standardowy (obliczony błąd standardowy średniej częstości jest około 2 razy większy od błędu statystycznego wynikającego z rozkładu dwumianowego)

Table 3.1. Frequency (%) of circulation types over southern Poland (1874–2008) and their standard error (The standard error of the average frequency calculated is about 2 times greater than the statistical error resulting from a binomial distribution)

Typ cyrkulacji Circulation type		Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter	Rok Year
1	Na	3,8 ± 0,2	4,8 ± 0,3	2,7 ± 0,2	2,4 ± 0,2	3,4 ± 0,1
2	NEa	4,6 ± 0,3	4,7 ± 0,3	2,2 ± 0,2	2,2 ± 0,2	3,4 ± 0,1
3	Ea	7,2 ± 0,4	4,2 ± 0,3	5,1 ± 0,4	6,1 ± 0,4	5,7 ± 0,2
4	SEa	5,2 ± 0,4	1,9 ± 0,2	6,2 ± 0,4	7,1 ± 0,5	5,1 ± 0,2
5	Sa	2,9 ± 0,2	1,7 ± 0,2	4,9 ± 0,4	3,4 ± 0,3	3,2 ± 0,2
6	SWa	2,6 ± 0,2	2,2 ± 0,2	6,5 ± 0,3	5,5 ± 0,3	4,2 ± 0,2
7	Wa	6,0 ± 0,3	10,3 ± 0,5	11,8 ± 0,5	14,0 ± 0,7	10,5 ± 0,3
8	NWa	4,2 ± 0,3	6,7 ± 0,3	5,4 ± 0,3	5,2 ± 0,4	5,4 ± 0,2
9	Ca	1,4 ± 0,2	2,1 ± 0,2	2,8 ± 0,3	2,4 ± 0,2	2,2 ± 0,2
10	Ka	11,0 ± 0,5	15,7 ± 0,6	12,0 ± 0,5	9,4 ± 0,4	12,0 ± 0,4
11	Nc	3,2 ± 0,2	3,7 ± 0,2	1,6 ± 0,2	1,7 ± 0,2	2,6 ± 0,1
12	NEc	2,8 ± 0,2	2,8 ± 0,2	1,2 ± 0,1	1,3 ± 0,1	2,0 ± 0,1
13	Ec	3,7 ± 0,3	1,7 ± 0,2	1,8 ± 0,2	1,9 ± 0,2	2,3 ± 0,1
14	SEc	4,0 ± 0,2	1,6 ± 0,1	2,2 ± 0,2	2,6 ± 0,2	2,6 ± 0,1
15	Sc	3,9 ± 0,3	1,4 ± 0,2	3,5 ± 0,3	3,2 ± 0,3	3,0 ± 0,2
16	SWc	5,6 ± 0,3	2,5 ± 0,2	5,9 ± 0,3	6,3 ± 0,3	5,1 ± 0,2
17	Wc	8,5 ± 0,4	10,1 ± 0,4	10,6 ± 0,4	12,8 ± 0,5	10,5 ± 0,3
18	NWc	5,1 ± 0,3	6,8 ± 0,3	4,0 ± 0,3	4,9 ± 0,3	5,2 ± 0,2
19	Cc	1,4 ± 0,1	1,2 ± 0,2	0,8 ± 0,1	0,7 ± 0,1	1,0 ± 0,1
20	Bc	11,0 ± 0,4	12,5 ± 0,4	7,0 ± 0,3	5,3 ± 0,3	9,0 ± 0,2
21	X	2,0 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,6 ± 0,1
1–21	Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1–10	a	49,0 ± 0,9	54,5 ± 0,7	59,7 ± 1,0	57,8 ± 1,1	55,2 ± 0,6
11–20	c	49,1 ± 0,9	44,2 ± 0,7	38,8 ± 0,9	40,7 ± 1,1	43,2 ± 0,6

Boldem oznaczono wartości największe; the highest values are indicated in **bold**

3.2. Masy powietrzne

Pogodę w południowej Polsce kształtują masy powietrzne o różnych cechach termicznych i wilgotnościowych. W 57,6% dni roku są to masy powietrza polarnego morskiego, a w lecie ten typ masy pojawia się aż w 65% dni (tab. 3.2). Jak pokazały wcześniejsze badania, ten typ masy powietrznej przeważa w całej Polsce (Bołaszewska i Reutt, 1962). Statystycznie w około co piątym dniu roku napływa powietrze polarne kontynentalne, kierowane znad wschodniej Europy. Znacznie rzadziej dociera

do południowej Polski powietrze z innych szerokości geograficznych niż umiarkowane. Jest to powietrze arktyczne – 8% dni w roku i zwrotnikowe – 3% dni w roku.

Masy powietrzne wykazują znaczne sezonowe zróżnicowanie częstości. I tak, powietrze polarne morskie osiąga maksimum frekwencji w lecie, powietrze polarne kontynentalne pojawia się częściej w zimie i wiosną, powietrze arktyczne zaś wiosną. Wiosną widoczna jest duża zmienność mas powietrznych. Przejawia się to największym udziałem powietrza z innych stref geograficznych – PA i PZ – w porównaniu do pozostałych pór roku. Dni ze zmianą masy (RMP) stanowią około 10% dni roku. Są to zarazem dni z frontami atmosferycznymi, które są strefami przejściowymi między różnymi masami powietrznymi.

Wcześniejsze badania T. Niedźwiedzia (1981) oraz R. Twardosza (2005b) pokazały, że w większości cyklonalnych typów cyrkulacji oraz sytuacji bezadwekcyjnej Ca+Ka dominuje powietrze polarne morskie stare. Z zachodu i północo-zachodu najczęściej napływają masy polarne morskie świeże. Powietrze arktyczne napływa głównie przy typach cyrkulacji N+NE. Ciepłe masy powietrzne (PPm i PZ) występują głównie przy splywie z kierunków S+SW. Największa zmienność mas powietrznych jest w bruzdzie cyklonalnej Bc. W 37% dni roku z tym typem cyrkulacji występują różne masy powietrzne.

Tabela 3.2. Częstość (%) dni z poszczególnymi masami powietrznymi w południowej Polsce i jej błąd standardowy (1951–2008)

Table 3.2. Frequency of days (%) with particular air masses over southern Poland and its standard error (1951–2008)

Masa powietrzna Air masses		Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter	Rok Year
Arktyczna – PA Arctic – A		11,5 ± 0,9	3,1 ± 0,5	8,6 ± 0,8	8,9 ± 0,8	8,0 ± 0,4
Polarna morska – PP Polar maritime – mP	świeża – PPm fresh – mPf	13,6 ± 0,8	25,7 ± 1,2	16,7 ± 0,9	14,0 ± 0,8	17,5 ± 0,6
	stara – PPms old – mPo	31,2 ± 1,5	35,6 ± 1,2	31,3 ± 1,2	32,7 ± 1,2	32,7 ± 0,9
	ciepła – PPmc warm – mPw	6,5 ± 0,6	3,6 ± 0,5	10,1 ± 0,8	9,4 ± 0,8	7,4 ± 0,4
	PP (m+ms+mc) mP (f+o+w)	51,3 ± 1,6	64,8 ± 1,6	58,1 ± 1,5	56,2 ± 1,9	57,6 ± 1,2
Polarna kontynentalna – PPk Polar continental – cP		23,4 ± 1,3	18,7 ± 1,3	20,1 ± 1,4	23,6 ± 1,8	21,4 ± 0,9
Zwrotnikowa – PZ Tropical – T		3,7 ± 0,5	4,3 ± 0,6	3,4 ± 0,5	1,0 ± 0,3	3,1 ± 0,3
Różne masy – RMP Various air masses – vAm		10,0 ± 1,0	9,2 ± 0,9	9,8 ± 0,9	10,4 ± 1,0	9,8 ± 0,9

3.3. Fronty atmosferyczne

Fronty atmosferyczne oddzielają różne typy przemieszczających się mas powietrznych. W południowej Polsce fronty przechodzą w 40% dni roku (tab. 3.3). Wiosną i w zimie są częstsze niż w lecie i jesieni. Spośród rozpatrywanych rodzajów frontów najczęściej występują fronty chłodne – 17% dni w roku; w lecie pojawiają się podczas 19,5% dni, a w zimie 14,4% dni. O połowę rzadziej przechodzą fronty ciepłe – 8,2% dni roku; w lecie osiągają minimum częstości – 5,4%, a w zimie maksimum – 9,8%. Taki rozkład sezonowy częstości frontów chłodnych i ciepłych jest charakterystyczny w umiarkowanej strefie geograficznej, co jest wynikiem sezonowo zmiennego zróżnicowania temperatury między powierzchnią lądu a oceanem. Około 8% dni stanowią dni, w których może się zdarzyć, że w południowej Polsce wystąpi kilka frontów. Takie sytuacje są typowe w bruzdzie cyklonalnej (Parczewski, 1964; Niedźwiedź, 1981). W tej sytuacji, o zróżnicowanych kierunkach adwekcji powietrza, fronty pojawiają się w około 80% dni (Twardosz, 2005b). Bardzo rzadko pojawiają się fronty stacjonarne. Większość frontów przemieszcza się z zachodu na wschód (Niedźwiedź, 1981), towarzysząc często układom cyklonalnym kierującym się właśnie w tym kierunku.

Tabela 3.3. Częstość (%) dni z poszczególnymi rodzajami frontów atmosferycznych w południowej Polsce i jej błąd standardowy (1951–2008)

Table 3.3. Frequency (%) of days with particular types of atmospheric front over southern Poland and its standard error (1951–2008)

Rodzaj frontu Type of front	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Zima Winter	Rok Year
Ciepły Warm	9,2 ± 0,5	5,4 ± 0,4	8,6 ± 0,5	9,8 ± 0,5	8,2 ± 0,3
Chłodny Cold	15,9 ± 0,7	19,5 ± 0,7	16,7 ± 0,5	14,4 ± 0,7	16,6 ± 0,4
Okluzji Occluded	5,9 ± 0,5	4,8 ± 0,5	4,4 ± 0,5	7,4 ± 0,5	5,6 ± 0,3
Stacjonarny Stationary	1,6 ± 0,3	2,2 ± 0,4	1,5 ± 0,3	1,3 ± 0,3	1,6 ± 0,2
Różne fronty Various fronts	8,7 ± 0,6	7,1 ± 0,6	7,4 ± 0,6	9,3 ± 0,5	8,1 ± 0,4
Razem dni z frontami Total days with fronts	41,2 ± 1,0	38,9 ± 1,0	38,5 ± 1,0	42,2 ± 1,2	40,1 ± 0,7

CZĘŚĆ II

4. OPADY CIEKŁE

4.1. Występowanie i sumy opadów ciekłych

Położenie Polski w strefie umiarkowanej, w zasięgu oddziaływania mas powietrznych morskich i kontynentalnych, skutkuje dużą zmiennością zarówno częstości i ilości opadów atmosferycznych, jak i temperatury powietrza. W miesiącach chłodnej połowy roku, a zwłaszcza w miesiącach zimowych, zdarzają się dni z temperaturą zarówno poniżej, jak i powyżej 0°C. Od wartości temperatury zależy zaś przede wszystkim postać opadu docierającego do powierzchni ziemi.

Z zestawienia średnich miesięcznych wartości temperatury w Krakowie (Piotrowicz, 2007) wynika, że nawet od grudnia do lutego dość często występują dni z dodatnią średnią temperaturą. Zdarza się jednak, że w marcu i listopadzie średnia temperatura osiąga wartości nawet do -4,0°C. Tak więc duży zakres wahań temperatury, zwłaszcza w miesiącach chłodnej pory roku, powoduje, że opady ciekłe występują jednak w ciągu całego roku, a nawet w środku zimy, a wyłączną postać stanowią tylko w lecie.

W Krakowie średnio w co trzecim dniu w roku występuje opad ciekły (tab. 4.1). Najwięcej dni z takim opadem jest w czerwcu – 15, co oznacza, że prawdopodobieństwo jego wystąpienia wynosi 50%. Jak należało oczekiwać, najmniej opadów ciekłych jest w lutym i styczniu, około 4 dni, czyli prawdopodobieństwo ich wystąpienia osiąga 14%.

W miesiącach letnich opady występują wyłącznie w postaci ciekłej, co oznacza, że prawdopodobieństwo warunkowe ich wystąpienia wynosi 100%, z wyjątkiem czerwca, kiedy to w całym okresie zdarzyły się 2 dni z innym typem opadu; były to opady mieszane. W jesieni opady ciekłe osiągają większe prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia niż wiosną (odpowiednio 85 i 75%). W miesiącach zimowych opady ciekłe stanowią od 28% w styczniu do 39% w grudniu wszystkich dni opadowych.

W rozpatrywanym okresie w wielu miesiącach zimowych opadów ciekłych nie było: w styczniu 16 razy, lutym 19 i grudniu 10 razy w ciągu 146 lat. Podczas zimy 1962/63 wystąpił tylko jeden dzień z opadem ciekłym. Bywało, że stanowiły one około połowy dni miesięcy zimowych: 16 dni w grudniu 1916, 1954, 1971 roku, 14 dni w styczniu 1916, 1921, 2007 roku. Zdarzyło się, że opadów ciekłych nie było też w innych miesiącach: marcu 1892, 1904 i 1944 roku, październiku 1951 i listopadzie 1978 roku. Październik 1951 roku był miesiącem w ogóle bez opadów nie tylko

Tabela 4.1. Liczba dni i prawdopodobieństwo wystąpienia opadów ciekłych oraz ich błąd standardowy (1863–2008)

Table 4.1. Number of days and probability of occurrence of liquid precipitation and their standard errors (1863–2008)

Okres Period	Dni z opadem Number of days with precipitation			Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) Probability of occurrence (%)	
	Śr. / Av.	Min.	Max.	Wystąpienia ¹ Occurrence ¹	Warunkowe ² Conditional ²
I	4,3 ± 0,3	0	14	13,8 ± 0,9	28,3 ± 1,7
II	4,0 ± 0,3	0	12	14,1 ± 0,9	29,3 ± 1,9
III	6,4 ± 0,3	0	18	20,7 ± 1,0	45,4 ± 1,9
IV	11,1 ± 0,3	3	20	37,1 ± 1,0	80,4 ± 1,3
V	14,3 ± 0,3	6	26	46,0 ± 1,1	97,2 ± 0,5
VI	15,0 ± 0,3	3	26	50,1 ± 1,1	99,9 ± 0,1
VII	14,9 ± 0,4	4	26	47,9 ± 1,1	100,0
VIII	13,9 ± 0,3	5	23	44,7 ± 1,0	100,0
IX	12,3 ± 0,3	5	23	40,8 ± 1,1	99,5 ± 0,15
X	12,3 ± 0,4	0	25	39,5 ± 1,3	93,2 ± 0,8
XI	9,5 ± 0,3	0	19	31,8 ± 1,1	64,6 ± 1,9
XII	6,0 ± 0,3	0	16	19,4 ± 1,1	39,0 ± 1,8
III–V	31,8 ± 0,6	16	61	34,6 ± 0,6	74,6 ± 0,9
VI–VIII	43,7 ± 0,6	22	64	47,6 ± 0,7	100,0
IX–XI	34,0 ± 0,6	15	55	37,4 ± 0,7	84,6 ± 0,8
XII–II	14,2 ± 0,5	1	36	15,7 ± 0,6	32,2 ± 1,2
I–XII	123,8 ± 1,3	85	160	33,9 ± 0,35	72,6 ± 0,52

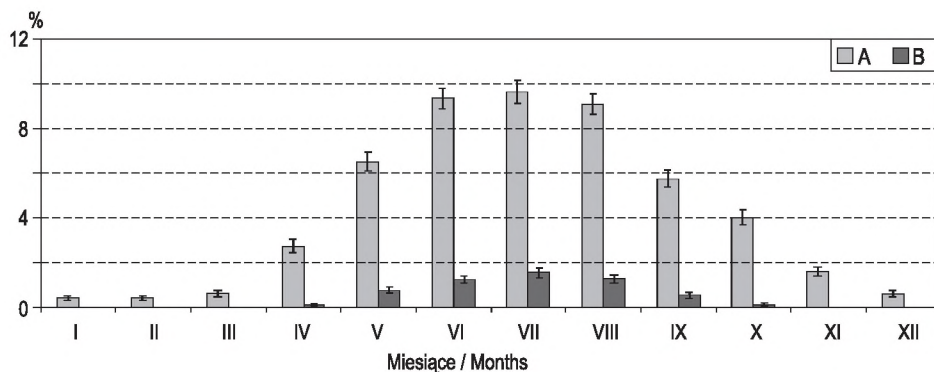
¹ liczone w stosunku do liczby dni w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days

² liczone w stosunku do liczby dni z opadem w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days with precipitation

w Polsce Południowej, ale na znacznym obszarze Europy Środkowej i Wschodniej (Cebulska i Twardosz, 2010).

Bardzo wyraźnie zaznaczony cykl roczny występowania mają dni z opadem ciekłym ≥ 10 mm i ≥ 30 mm (rys. 4.1). Opady silne występują w każdym miesiącu, prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest jednak bardzo zróżnicowane: od około 0,5% w miesiącach zimowych do prawie 10% w miesiącach letnich. Opady bardzo silne występują natomiast od kwietnia do października: od 0,1% dni w kwietniu, tzn. raz na 30 lat, do 1,5% dni w lipcu, tzn. raz na 2 lata.

Charakterystyki sum opadów ciekłych w miesiącach i sezonach zestawiono w tabelach 4.2–4.3. Zgodnie z oczekiwaniami największe sumy opadów ciekłych, zarówno średnich, jak i skrajnych, występują w lipcu (tab. 4.2). Ze względu na silną asymetrię rozkładu sum opadów, zwłaszcza miesięcznych (skośność od 0,70 w paź-



Rys. 4.1. Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) dnia z opadem ciekłym ≥ 10 mm (A) i ≥ 30 mm (B) i jego błąd standardowy (1863–2008)

Fig. 4.1. Probabilities (%) of days with liquid precipitation ≥ 10 mm (A) and ≥ 30 mm (B) and their standard errors (1863–2008)

Tabela 4.2. Sumy opadów ciekłych, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności, γ_1 – skośność (błąd standardowy skośności wynosi 0,2) (1863–2008)

Table 4.2. Totals of liquid precipitation, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard error, V – variability coefficient, γ_1 – skewness (the standard error of skewness is 0.2) (1863–2008)

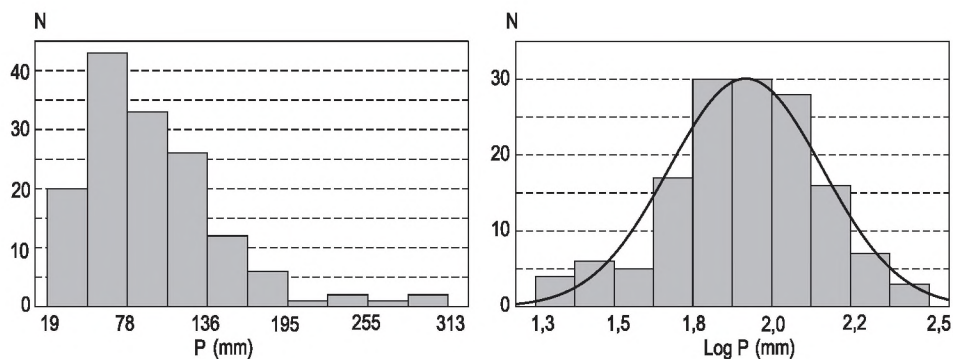
Okres Period	Suma / Totals (mm)			σ (mm)	V (%)	γ_1
	Śr./ Av.	Min.	Max.			
I	9,6 \pm 0,8	0,0	52,9	9,4	98	1,7
II	8,5 \pm 0,8	0,0	62,8	9,9	117	2,1
III	15,4 \pm 1,1	0,0	81,1	12,8	83	1,6
IV	36,6 \pm 1,9	3,3	137,3	22,5	61	1,4
V	70,7 \pm 3,3	10,3	230,3	39,8	56	1,4
VI	90,7 \pm 3,5	9,5	250,4	42,2	46	0,7
VII	96,9 \pm 4,3	19,1	313,1	51,9	54	1,4
VIII	86,7 \pm 3,4	16,5	216,5	40,9	47	1,0
IX	59,6 \pm 2,9	9,3	199,3	35,2	59	1,3
X	44,7 \pm 2,4	0,0	136,3	29,1	65	0,70
XI	25,0 \pm 1,3	0,0	80,9	15,6	62	0,81
XII	13,9 \pm 1,1	0,0	64,9	12,9	93	1,36
III–V	122,7 \pm 4,1	28,6	343,2	50,1	41	1,2
VI–VIII	274,3 \pm 6,8	97,5	537,0	81,9	30	0,57
IX–XI	129,3 \pm 4,1	44,5	290,7	49,2	38	0,80
XII–II	31,8 \pm 1,7	2,7	98,2	20,2	63	1,2
I–XII	558,2 \pm 8,8	326,9	894,9	106,3	19	0,42

dzienniku do 2,13 w lutym), dokonano transformacji logarytmicznej sum, co dało możliwość zastosowania testu *t* Studenta do oceny istotności różnicy średnich sum. Na rysunku 4.2 pokazano rozkład częstości opadów w lipcu przed i po transformacji; współczynnik asymetrii zmniejszył się z $1,42 \pm 0,2$ do $-0,30 \pm 0,2$. Statystyka Shapiro–Wilka odpowiada *p*-wartości równej 0,12, co oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności z rozkładem normalnym.

Różnice między średnimi opadami w sąsiednich miesiącach od lutego do czerwca i od sierpnia do grudnia są istotne statystycznie, w miesiącach zimowych i letnich natomiast różnice te są nieistotne statystycznie. Tylko w grudniu średnia suma opadów ciekłych istotnie różni się statystycznie od opadów w styczniu i lutym. W przypadku opadów sezonowych nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic między średnimi opadami na wiosnę i w jesieni.

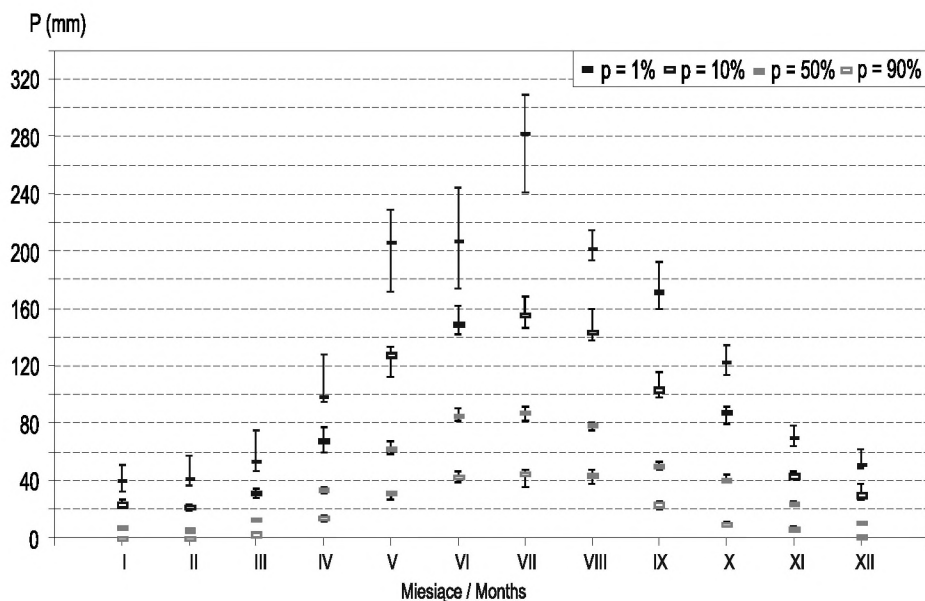
Przebieg roczny kwantyli sum opadów ciekłych pokazany na rysunku 4.3 wykazuje duże zróżnicowanie. Widać to m.in. w wartościach kwantyla $p = 90\%$, który osiąga wartość 0 mm opadu w styczniu i lutym (rys. 4.3).

Opady ciekłe prawie w całości kształtują sumę opadów w miesiącach od maja do września (tab. 4.3). W zimie ich udział zmniejsza się średnio do około 33%; najmniejszy jest w lutym – 28%, a największy w grudniu – 39%. Najbardziej deszczową zimą, z punktu widzenia udziału opadów ciekłych (81%) w ogólnej sumie opadów, była zima 1997/98, a najmniej deszczową (2%) zima 1969/70. W miesiącach zimowych największy udział opadów ciekłych zmieniał się od 81% w styczniu 1925 roku do 96% w grudniu 1934 roku. Najbardziej zmienny udział opadów ciekłych w sumie miesięcznej opadów jest w marcu; od 0% w 1892, 1904 i 1944 do 100% w latach 1873, 1882, 1959 i 1989.



Rys. 4.2. Rozkład częstości (N) sum opadów ciekłych w lipcu (lewy) i po transformacji logarytmicznej sum (prawy); do histogramu dopasowano rozkład normalny

Fig. 4.2. Probability distribution (N) of liquid precipitation totals for July before (left) and after logarithmic transformation (right); a normal distribution is fitted to the histogram



Rys. 4.3. Przebieg roczny kwantyli sum opadów ciekłych (1863–2008) i ich błąd standardowy

Fig. 4.3. Annual distribution of liquid precipitation quantiles (1863–2008) and their standard errors

Tabela 4.3. Udział (%) opadów ciekłych w ogólnej sumie opadów i jego błąd standardowy (1863–2008)

Table 4.3. Contribution (%) of liquid precipitation to the overall total and its standard error (1863–2008)

Okres / Period	Śr./ Av. (%)	Min. (%)	Max. (%)
I	31,1 ± 2,0	0	81,3
II	27,6 ± 2,1	0	92,4
III	44,2 ± 2,3	0	100
IV	80,3 ± 1,7	14,2	100
V	97,7 ± 0,5	64,6	100
VI	99,9 ± 0,1	86,1	100
VII	100	100	100
VIII	100	100	100
IX	99,6 ± 0,2	84,4	100
X	91,8 ± 1,3	28,7	100
XI	62,5 ± 2,3	0	100
XII	39,4 ± 2,3	0	96,0
III–V	79,1 ± 1,1	41,8	99,7
VI–VIII	99,95 ± 0,04	94,8	100
IX–XI	86,1 ± 0,9	43,5	100
XII–II	33,1 ± 1,5	1,8	81,1
I–XII	82,3 ± 0,5	61,8	95,5

4.2. Związek opadów ciekłych z temperaturą powietrza

Temperatura powietrza, obok zawartości pary wodnej, jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o częstotliwości i ilości opadów, a przede wszystkim o postaci opadu docierającego do powierzchni ziemi. W tabeli 4.4 zestawiono wartości współczynników korelacji między temperaturą a liczbą dni i sumami opadów ciekłych. Ze względu na nieciągłość opadów związek korelacyjny określono na podstawie wartości miesięcznych. Współczynniki korelacji są najczęściej istotne statystycznie, z wyjątkiem kwietnia i października oraz jesieni i sum opadów wiosny.

W okresie od maja do października obie charakterystyki opadów ciekłych są ujemnie skorelowane z temperaturą powietrza, co oznacza, że wraz ze wzrostem temperatury następuje spadek częstotliwości i sum opadów ciekłych. Od listopada do kwietnia związek ten jest natomiast dodatni, czyli informuje o wzroście zarówno częstotliwości, jak i wielkości opadów ciekłych wraz ze wzrostem temperatury. Zdecydowanie większy wpływ temperatury na opady ujawnia się w częstotliwości opadów ciekłych, a mniej w ich sumach. Najsilniejsze związki statystyczne opadów z temperaturą uzyskano w miesiącach zimowych, a zwłaszcza całej zimy. I tak, w zimie 56% wariancji dni z opadem ciekłym może być wyjaśnione zmiennością temperatury powietrza, a w przypadku sum opadów 31% wariancji (tab. 4.5–4.6). Dobrą ilustracją graficzną związku opadów ciekłych z temperaturą jest przebieg standaryzowanych wartości średniej temperatury i liczby dni z opadem ciekłym w zimie pokazany na rysunku 4.4. Wzrostowi temperatury średniej o 1°C w zimie odpowiada wzrost liczby dni z opadem ciekłym o 3, a wzrost sum opadów ciekłych o 5 mm (tab. 4.5–4.6).

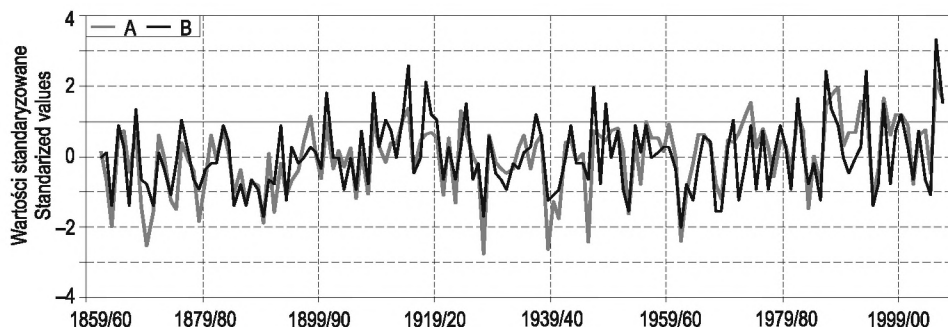
W lecie temperatura powietrza w mniejszym stopniu decyduje o zmienności opadów – odpowiednio w 28% wariancji dni z opadem i 16% wariancji sum opadów. Wraz ze wzrostem temperatury o 1°C zmniejsza się liczba dni z opadem ciekłym w lecie o 4, a sum opadów o 33 mm. Tak więc w klimacie Polski najcieplejsze lata są

Tabela 4.4. Współczynniki korelacji (r) między temperaturą powietrza a liczbą dni z opadem ciekłym – Ld i sumami opadów ciekłych – P; **boldem** oznaczono wartości istotne na poziomie $\alpha = 0,05$

Table 4.4. Correlation coefficients (r) between air temperature and number of days with liquid precipitation – Ld and liquid precipitation totals – P; values that are statistically significant at $\alpha = 0,05$ are indicated in **bold**

	Miesiące / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ld	0,74	0,67	0,56	0,05	-0,36	-0,55	-0,52	-0,54	-0,52	-0,12	0,64	0,71
P	0,54	0,48	0,36	0,04	-0,26	-0,32	-0,32	-0,35	-0,26	-0,10	0,50	0,56

	Okres / Period				
	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II	I–XI
Ld	0,23	-0,53	0,03	0,75	0,19
P	0,03	-0,38	-0,02	0,56	-0,06



Rys. 4.4. Przebieg średniej temperatury (A) i liczby dni z opadem ciekłym (B) w zimie (wartości standaryzowane) (1863–2008)

Fig. 4.4. Variation of average temperature (A) and the number of days with liquid precipitation (B) for winter (standardized values) (1863–2008)

Tabela 4.5. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność liczby dni z opadem ciekłym od średniej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 4.5. Linear regression coefficients describing the dependency of the number of days with liquid precipitation on average temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/°C) Regression coefficient (days/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,54	$+0,70 \pm 0,05$	0,000000	***
II	0,45	$+0,62 \pm 0,06$	0,000000	***
III	0,31	$+0,84 \pm 0,10$	0,000000	***
IV	0,002	$+0,10 \pm 0,16$	0,54	—
V	0,13	$-0,77 \pm 0,16$	0,000008	***
VI	0,31	$-1,57 \pm 0,20$	0,000000	***
VII	0,27	$-1,65 \pm 0,23$	0,000000	***
VIII	0,29	$-1,54 \pm 0,20$	0,000000	***
IX	0,27	$-1,40 \pm 0,20$	0,000000	***
X	0,01	$-0,32 \pm 0,22$	0,15	—
XI	0,41	$+1,16 \pm 0,11$	0,000000	***
XII	0,50	$+1,07 \pm 0,09$	0,000000	***
III–V	0,054	$+1,19 \pm 0,42$	0,0049	***
VI–VIII	0,28	$-4,33 \pm 0,57$	0,000000	***
IX–XI	0,0006	$+0,16 \pm 0,53$	0,76	—
XII–II	0,56	$+2,13 \pm 0,16$	0,000000	***
I–XII	0,037	$+2,96 \pm 1,25$	0,019	*

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

Tabela 4.6. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność sum opadów ciekłych od średniej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 4.6. Linear regression coefficients describing the dependency of liquid precipitation totals on average temperature (1863–2008)

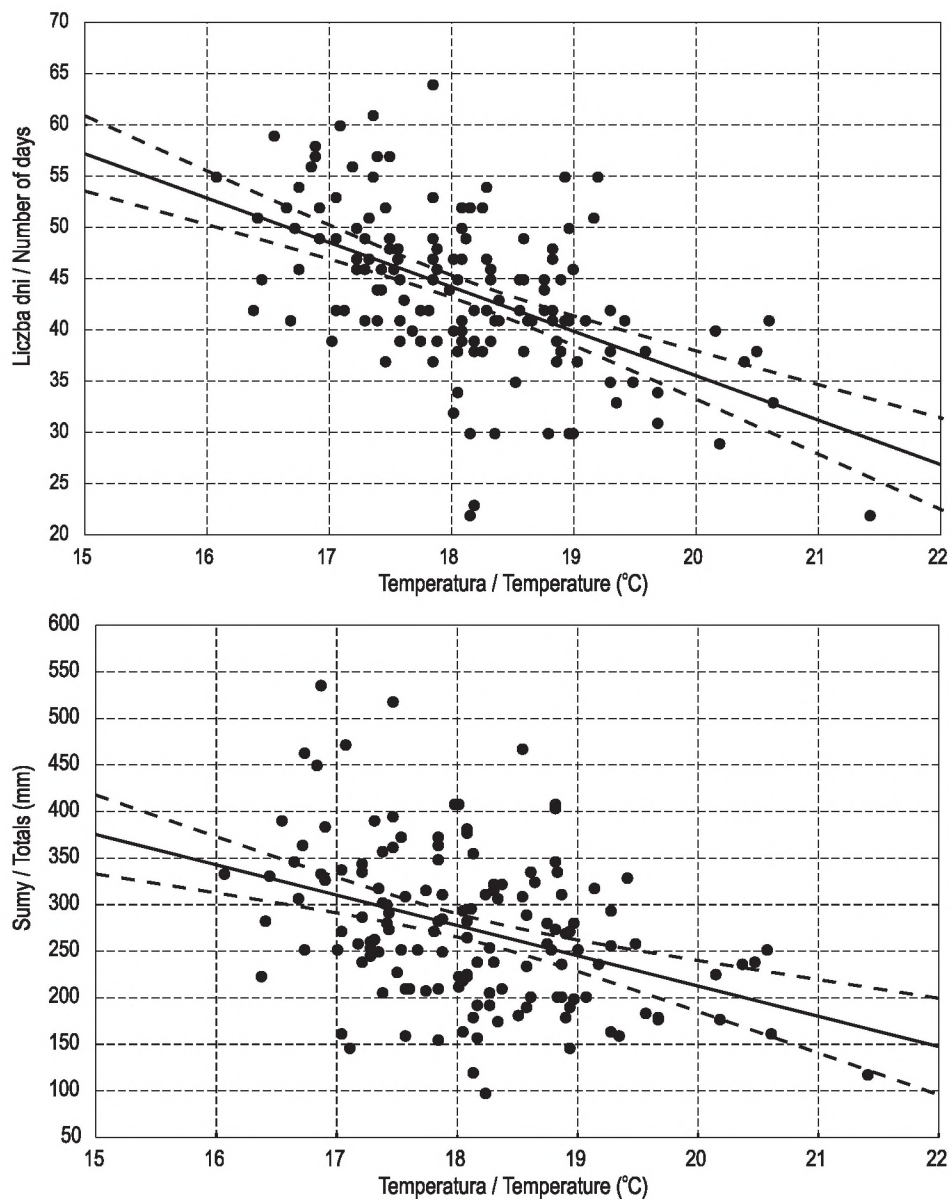
Okres Period	R^2	Współczynnik regresji Regression coefficient (mm/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,29	+1,52 ± 0,19	0,000000	***
II	0,23	+1,41 ± 0,21	0,000000	***
III	0,13	+1,89 ± 0,41	0,000008	***
IV	0,002	+0,5 ± 1,0	0,60	—
V	0,067	−5,62 ± 1,74	0,001	***
VI	0,10	−9,61 ± 2,35	0,00007	***
VII	0,10	−12,28 ± 3,06	0,00009	***
VIII	0,12	−10,65 ± 2,41	0,00002	***
IX	0,067	−6,12 ± 1,90	0,001	***
X	0,009	−1,64 ± 1,38	0,23	—
XI	0,25	+3,64 ± 0,53	0,000000	***
XII	0,31	+2,73 ± 0,34	0,000000	***
III–V	0,0007	+1,0 ± 3,1	0,74	—
VI–VIII	0,14	−32,52 ± 6,6	0,000002	***
IX–XI	0,0002	−0,64 ± 3,4	0,85	—
XII–II	0,31	+4,91 ± 0,61	0,000000	***
I–XII	0,004	−6,66 ± 8,84	0,45	—

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

zarazem najsuchsze (rys. 4.5) i ta suchość nie sprzyja powstawaniu opadów, pomimo że wraz ze wzrostem temperatury nasila się konwekcja. Przy średniej temperaturze lata wyższej od 20°C liczba dni z opadem maleje poniżej 40, a sumy opadów poniżej 250 mm (rys. 4.5). Podobne związki opadów z temperaturą uzyskał K. Kożuchowski (2004), wykazując narastanie suchości pogody w lecie wraz ze wzrostem temperatury powietrza.

4.3. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów ciekłych

W Krakowie, podobnie jak w wielu innych miejscach na świecie (IPCC, 2007), bardzo wyraźne są trendy zmian temperatury powietrza. W rozpatrywanym okresie 1863–2008 temperatura powietrza wykazuje trend wzrostowy we wszystkich miesiącach i porach roku istotny statystycznie, z wyjątkiem września (tab. 4.7); w grud-



Rys. 4.5. Zależność liczby dni (góra) i sum opadów ciekłych (dół) od średniej temperatury w lecie (1863–2008) i 95% przedział ufności linii regresji

Fig. 4.5. Dependence of the number of days with liquid precipitation (top) and liquid precipitation totals (bottom) on average temperature in summer (1863–2008) and 95% confidence intervals for the regression line

Tabela 4.7. Współczynniki trendu średniej temperatury powietrza opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 4.7. Coefficient of trend of mean temperature as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (°C/100 lat) Regression coefficient (°C/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,057	+1,90 ± 0,64	0,0012	***
II	0,049	+1,78 ± 0,65	0,0069	***
III	0,071	+1,55 ± 0,47	0,0011	***
IV	0,13	+1,54 ± 0,34	0,000012	***
V	0,13	+1,56 ± 0,34	0,000008	***
VI	0,089	+1,0 ± 0,27	0,00026	***
VII	0,10	+1,02 ± 0,25	0,00008	***
VIII	0,23	+1,50 ± 0,23	0,000000	***
IX	0,024	+0,5 ± 0,3	0,061	—
X	0,093	+1,27 ± 0,33	0,00018	***
XI	0,11	+1,69 ± 0,39	0,00003	***
XII	0,10	+2,02 ± 0,49	0,00007	***
III–V	0,23	+1,55 ± 0,24	0,00000	***
VI–VIII	0,27	+1,17 ± 0,16	0,00000	***
IX–XI	0,17	+1,17 ± 0,22	0,00000	***
XII–II	0,12	+1,91 ± 0,42	0,000013	***
I–XII	0,38	+1,45 ± 0,15	0,00000	***

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

niu jest on największy i wynosi 2,0°C na 100 lat. Jak pokazują wyniki badań H. Ye (2008), wraz ze wzrostem temperatury powietrza następuje wzrost wszystkich typów opadów – ciekłych, mieszanych i stałych w zimie na półkuli północnej. Ponadto w jesieni występuje wzrost częstości dni z opadem deszczu. W Raporcie IPCC (2007) również wskazuje się na wzrost częstości opadów ciekłych wraz z postępującym wzrostem temperatury.

W przebiegu wieloletnim opadów ciekłych w Krakowie nie stwierdza się już tak jednoznacznych trendów jak w przypadku temperatury, pomimo że – jak wykazano w poprzednim podrozdziale – związki między tymi elementami istnieją. Jak wynika z zestawienia w tabelach 4.8–4.10, trendy istotne statystycznie występują tylko w liczbie dni z opadem ciekłym. I tak, wzrost częstości opadów ciekłych stwierdza się w grudniu, a więc miesiącu o największym wzroście temperatury powietrza. Spadek natomiast zaznacza się w sierpniu i w całym okresie letnim. W sumach opadów nie stwierdza się natomiast żadnych zmian istotnych statystycznych na poziomie $\alpha = 0,05$. Sumy opadów bowiem są o wiele bardziej zmienne niż liczba dni z opadem

Tabela 4.8. Współczynniki trendu liczby dni z opadem ciekłym opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 4.8. Coefficient of trend of number of days with liquid precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/100 lat) Regression coefficient (days/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,0002	$+0,1 \pm 0,6$	0,86	—
II	0,007	$+0,7 \pm 0,6$	0,29	—
III	0,02	$+1,4 \pm 0,7$	0,061	—
IV	0,0002	$+0,1 \pm 0,7$	0,86	—
V	0,000009	$-0,03 \pm 0,8$	0,97	—
VI	0,02	$-1,2 \pm 0,8$	0,11	—
VII	0,002	$+0,02 \pm 0,8$	0,97	—
VIII	0,039	$-1,79 \pm 0,73$	0,015	*
IX	0,0004	$-0,2 \pm 0,8$	0,81	—
X	0,0047	$-0,8 \pm 0,9$	0,41	—
XI	0,019	$+1,3 \pm 0,8$	0,097	—
XII	0,028	$+1,60 \pm 0,78$	0,041	*
III–V	0,0075	$+1,4 \pm 1,3$	0,29	—
VI–VIII	0,027	$-3,02 \pm 1,51$	0,047	*
IX–XI	0,0003	$+0,3 \pm 1,5$	0,85	—
XII–II	0,022	$+2,3 \pm 1,2$	0,069	—
I–XII	0,0008	$+1,1 \pm 3,0$	0,72	—

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Tabela 4.9. Współczynniki trendu sum opadów ciekłych opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 4.9. Coefficient of trend of the totals of liquid precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/100 lat) Regression coefficient (mm/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,0003	$+0,4 \pm 1,8$	0,84	—
II	0,0005	$+0,5 \pm 1,9$	0,78	—
III	0,02	$+4,4 \pm 2,5$	0,079	—
IV	0,002	$+2,5 \pm 4,4$	0,57	—
V	0,0003	$+1,5 \pm 7,8$	0,84	—
VI	0,0009	$-2,9 \pm 8,3$	0,72	—
VII	0,002	$-6,0 \pm 10,2$	0,56	—
VIII	0,01	$-9,8 \pm 8,0$	0,22	—
IX	0,0001	$0,7 \pm 6,9$	0,92	—
X	0,006	$-5,4 \pm 5,7$	0,34	—
XI	0,002	$+1,4 \pm 3,0$	0,63	—

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/100 lat) Regression coefficient (mm/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
XII	0,0000	+0,1 ± 2,5	0,97	—
III–V	0,005	+8,4 ± 9,8	0,39	—
VI–VIII	0,009	–18,7 ± 16,0	0,25	—
IX–XI	0,0007	–3,2 ± 9,7	0,74	—
XII–II	0,0004	+0,9 ± 3,9	0,82	—
I–XII	0,003	–12,71 ± 20,90	0,54	—

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Tabela 4.10. Współczynniki trendu udziału (%) opadów ciekłych w ogólnej liczbie dni/sumach opadów opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 4.10. Coefficient of trend of the contribution (%) of liquid precipitation to overall number of days with precipitation/precipitation totals as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (%/100 lat) Regression coefficient (%/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
Liczba dni z opadem / Number of days with precipitation				
III–V	0,031	+4,7 ± 2,1	0,033	*
IX–XI	0,001	+0,9 ± 1,9	0,63	—
XII–II	0,00001	–0,1 ± 2,8	0,96	—
I–XII	0,003	–0,8 ± 1,2	0,49	—
Sumy opadów / Precipitation totals				
III–V	0,02	4,1 ± 2,5	0,097	—
IX–XI	0,004	+1,4 ± 2,0	0,47	—
XII–II	0,008	–3,8 ± 3,4	0,27	—
I–XII	0,004	–0,8 ± 1,1	0,47	—

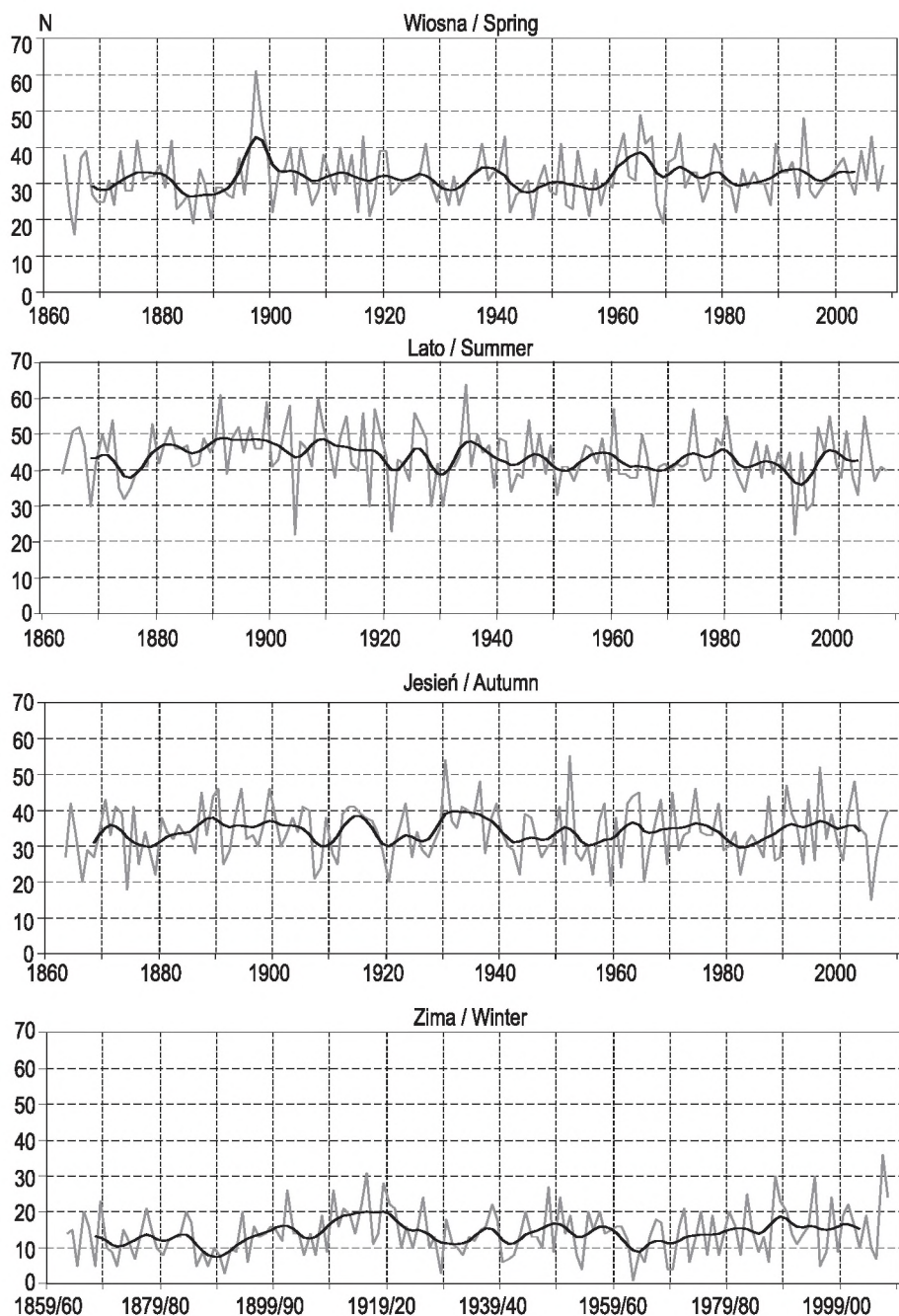
¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

i tylko bardzo duże zmiany wielkości opadów mogą osiągać istotność statystyczną. Tak więc do zmian liczby dni z opadem nie zawsze nawiązują zmiany sum opadów, na co wskazują także inni badacze, np. H. Ye (2008). Na podkreślenie zasługuje znaczący wzrost, istotny statystycznie na poziomie $\alpha = 0,05$, udziału liczby dni z opadem ciekłym w ogólnej liczbie dni z opadem na wiosnę (tab. 4.10). W przypadku sum opadów w tej porze roku udział ten również wzrasta, ale jest on istotny na poziomie $\alpha = 0,10$.

Jeśli utrzyma się trend wzrostowy temperatury powietrza, to należy oczekiwać, że w Polsce Południowej w lecie opadów ciekłych będzie coraz mniej i będą dostarczać coraz mniej wody, zwłaszcza że trend spadkowy, chociaż nieistotny statystycznie, dotyczy także sum opadów w tej porze (tab. 4.10). Deficyt wody opadowej może być pogłębiony przez wzmożone parowanie na skutek wzrostu temperatury powietrza. Na spadek opadów w miesiącach letnich, z wyjątkiem czerwca, wskazują także wyniki badań modelowych odnoszących się do opadów w okresie 2041–2050 w Łodzi (Kozuchowski, 2004). Badania te wskazują także na wyraźny wzrost opadów w miesiącach chłodnej połowy roku. Zatem konsekwencją zmieniającego się klimatu może być wzrost częstości i ilości opadów ciekłych w zimie, a spadek w lecie.

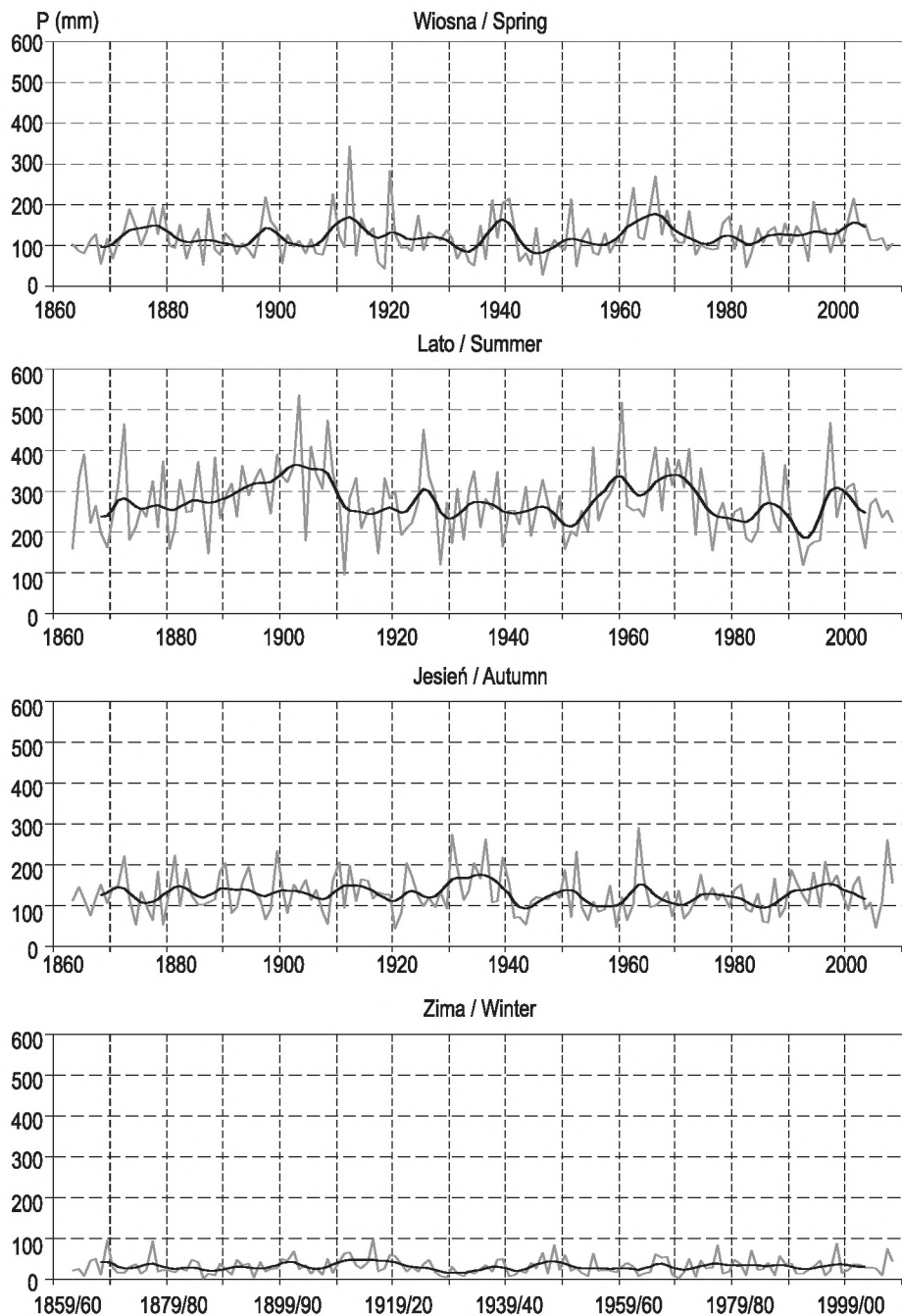
Bardzo duża zmienność z roku na rok opadów ciekłych jest dobrze widoczna w wartościach sezonowych, jak i rocznych, zarówno w liczbie dni, jak i sumach opadów (rys. 4.6–4.8). Zmienność sum opadów ciekłych w 70% wyjaśnia zmienność liczby dni z opadem silnym, która podobnie jak sumy opadów nie wykazuje istotnych zmian wieloletnich. Jak należało oczekiwać, wahania rocznych opadów ciekłych (rys. 4.8) nawiązują do wahań opadów ciekłych w lecie (rys. 4.6–4.7), kiedy jest ich najwięcej i są najbardziej wydajne. W celu uchwycenia tendencji krótkookresowych przebieg wieloletni charakterystyk opadów zobrazowano za pomocą kumulowanych odchyień od średniej wieloletniej (rys. 4.9–4.10). I tak, w rocznych wartościach liczby dni z opadem i sum opadów dobrze widoczne są okresy z odchyleniami dodatnimi i ujemnymi, chociaż nie zawsze pokrywającymi się w czasie. Wspólną cechą zmienności obu charakterystyk opadów ciekłych było występowanie odchyień ujemnych do roku 1892, odchyień dodatnich w latach 1893–1919 i od 1996 roku. Mokre 2 ostatnie lata, 2009 i 2010, potwierdzają utrzymywanie się tej rosnącej tendencji opadów. W latach 1920–1995 roczna liczba dni z opadem była częściej większa od średniej wieloletniej. W przypadku rocznych opadów ciekłych można wyróżnić w tych latach 2 okresy o odchyleniach ujemnych: 1920–1950 i 1973–1995 oraz okres o odchyleniach dodatnich 1960–1972. Podobne okresy z odchyleniami dodatnimi i ujemnymi występują w opadach letnich, z wyjątkiem ostatnich lat (rys. 4.10). Mianowicie od 1996 roku nie stwierdza się ani wzrostu, ani spadku częstości i sum opadów ciekłych w cieplej porze, jak to występuje w wartościach rocznych. Stwierdza się natomiast wzrost częstości opadów ciekłych w zimie, który utrzymuje się już od 1988 roku. W tym okresie można dopatrzeć się także słabej tendencji wzrostowej częstości i sum opadów ciekłych w porach przejściowych.

Podsumowując, należy stwierdzić, że ocieplenie klimatu w ostatnich latach przyczyniło się do wzrostu opadów ciekłych, szczególnie w okresie zimowym, co jest wynikiem bardzo dużego wzrostu temperatury w tej porze roku. Taką prawidłowość potwierdzają także inni autorzy, m.in. wymieniony wcześniej H. Ye (2008). W lecie, ze względu na mniejszy wzrost temperatury powietrza, nie ma tak wyraźnego określonego kierunku zmian opadów, zwłaszcza ich częstości.



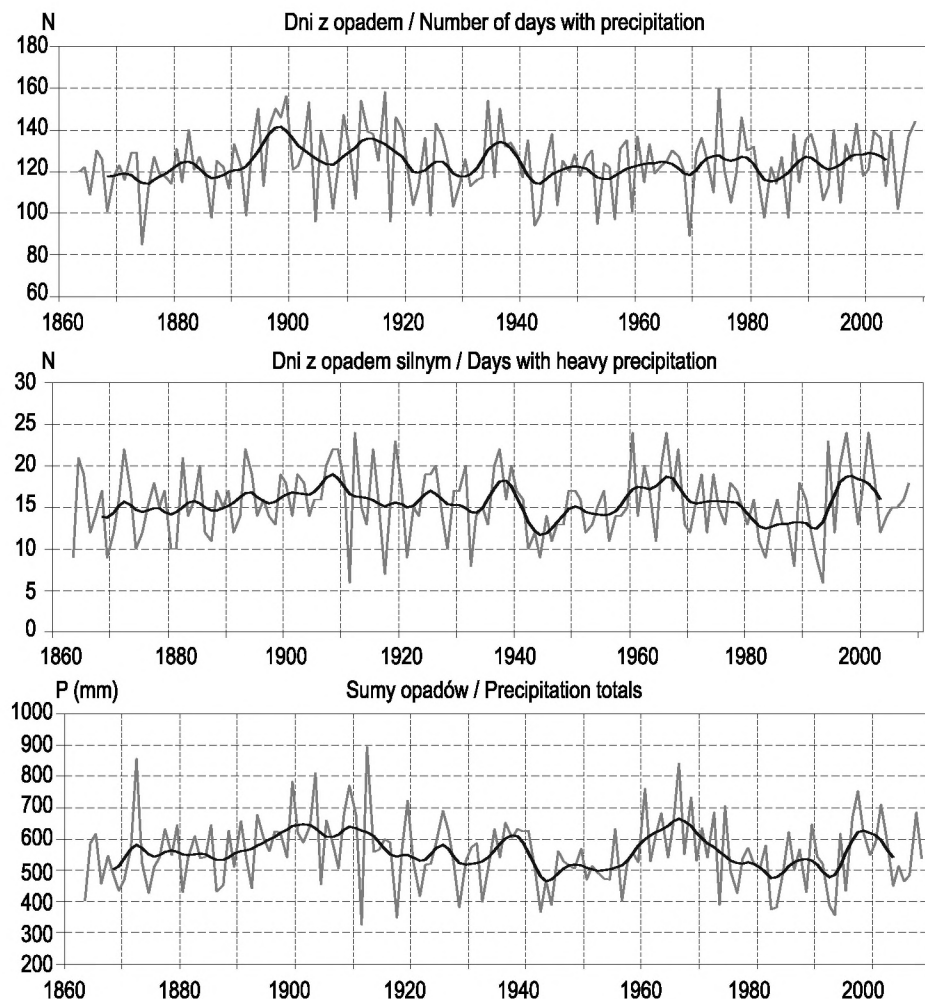
Rys. 4.6. Przebieg wieloletni liczby dni z opadem ciekłym (N) w porach roku; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 4.6. Variation of the number of days with liquid precipitation (N) by season; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)



Rys. 4.7. Przebieg wieloletni sum opadów ciekłych w porach roku; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 4.7. Variation of liquid precipitation totals by season; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)



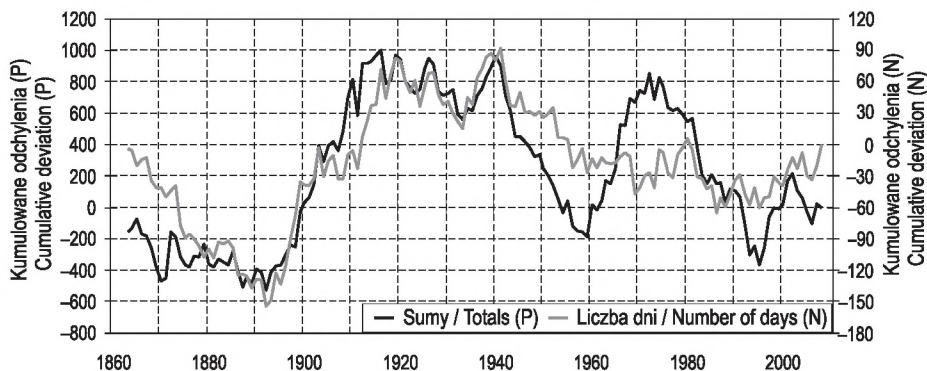
Rys. 4.8. Przebieg rocznej liczby dni z opadem i sum opadów ciekłych; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 4.8. Variation of the annual number of days with liquid precipitation and liquid precipitation totals; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)

4.4. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady ciekłe

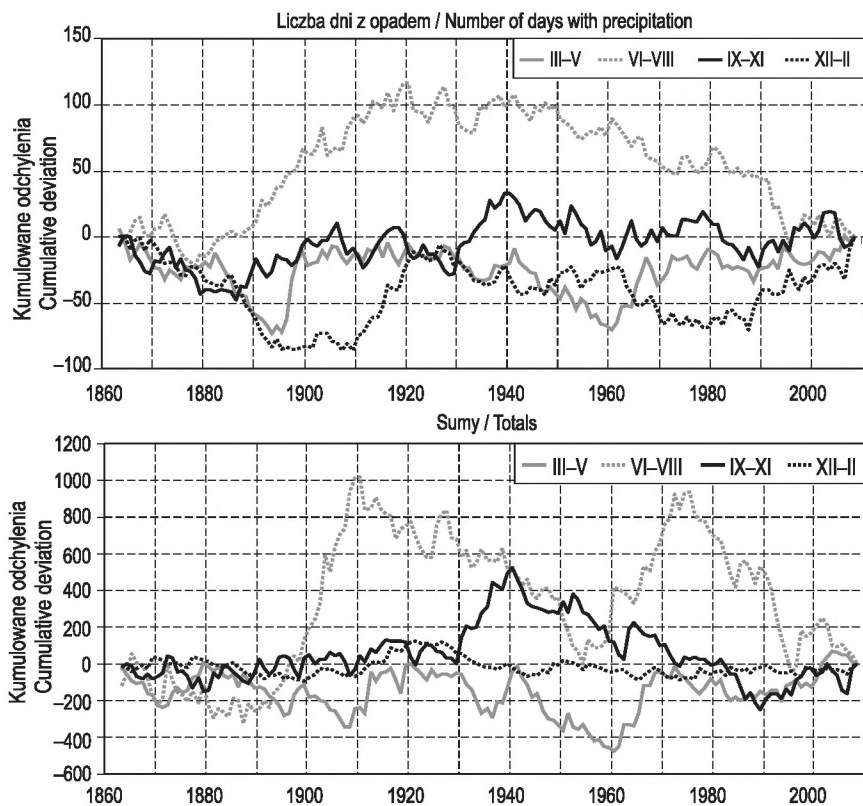
4.4.1. Związek opadów ciekłych z typami cyrkulacji

Wiele informacji o zmienności opadów dostarcza analiza związku ich występowania z cyrkulacją atmosferyczną, która decyduje nie tylko o cechach termicznych, ale także wilgotnościowych mas powietrznych napływających nieraz z odległych



Rys. 4.9. Kumulowane odchylenia rocznych sum (P) i liczby dni z opadem (N) ciekłym od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 4.9. Cumulative deviations of annual totals (P) and number of days (N) with liquid precipitation from the multiannual average (1863–2008)



Rys. 4.10. Kumulowane odchylenia liczby dni (górną) i sum opadów ciekłych (dół) w porach roku od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 4.10. Cumulative deviations of number of days with liquid precipitation (top) and seasonal totals (bottom) from the multiannual average (1863–2008)

obszarów źródłowych nad dany obszar. Ze względu na fakt, że wpływ cyrkulacji na występowanie typów opadów ma charakter niestacjonarny w przebiegu rocznym, prawdopodobieństwo opadów obliczono w typach cyrkulacji tylko w podziale na pory roku. Do oceny związku opadów z typami cyrkulacji posłużono się prawdopodobieństwem warunkowym, a więc z uwzględnieniem liczby dni z typami cyrkulacji.

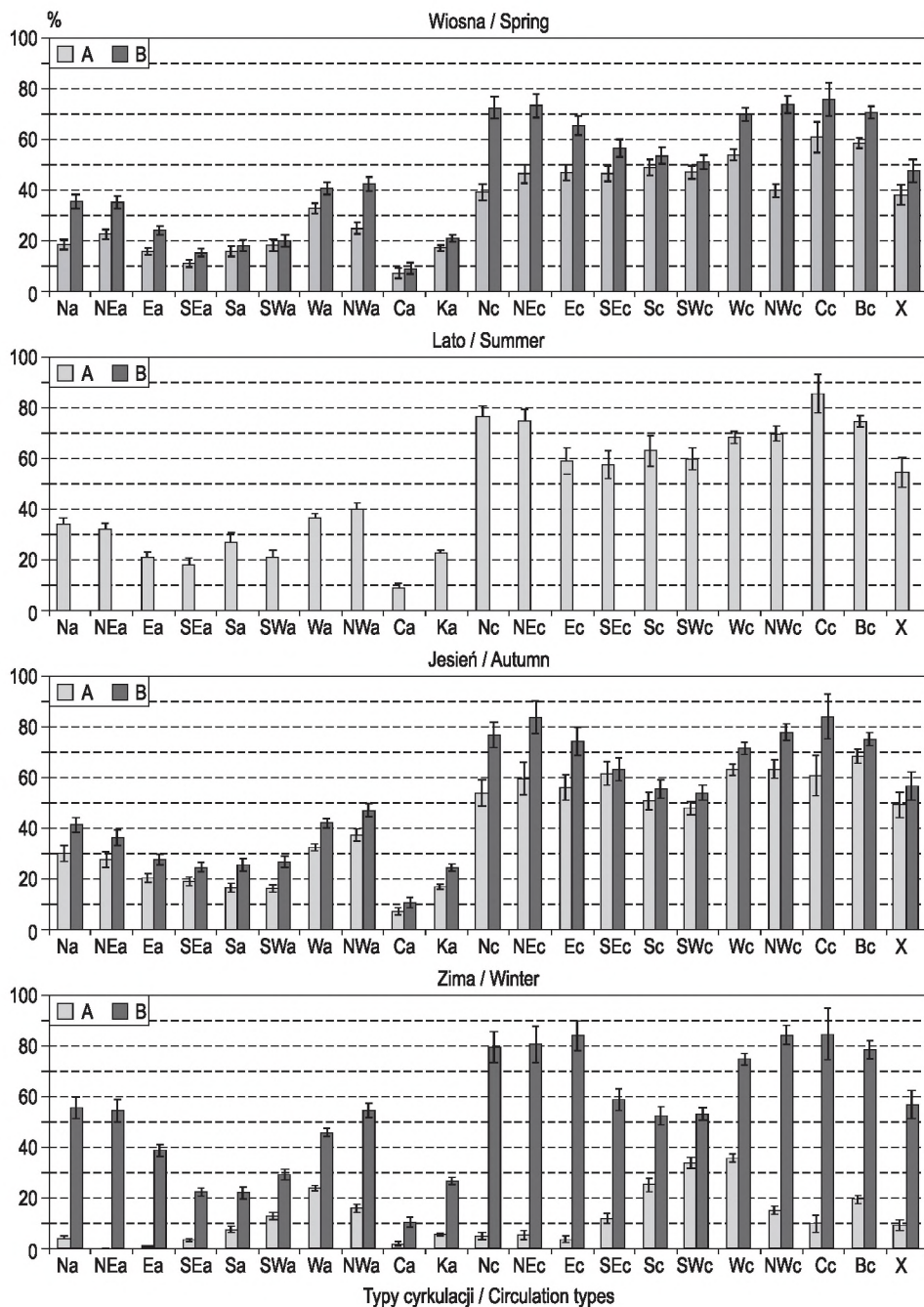
W tabeli 4.11 zestawiono podstawowe charakterystyki opadów ciekłych w podziale na typy cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej. Jak należało oczekiwać, w Krakowie najbardziej sprzyjające warunki do występowania opadów ciekłych, bez względu na porę roku, są w cyrkulacji cyklonalnej. W strefie umiarkowanej cyklony przemieszczające się znad Atlantyku nad Europę przynoszą powietrze wilgotne, co sprzyja powstawaniu opadów deszczu w ciągu całego roku. W zimie w co czwartym dniu z typem cyrkulacji cyklonalnej występuje opad ciekły, a w lecie aż w 70% dni. W cyrkulacji antycyklonalnej prawdopodobieństwo opadu ciekłego jest o wiele mniejsze: od 10% w zimie do 29% w lecie. Sumy opadów ciekłych wykazują również znaczne zróżnicowanie w zależności od charakteru cyrkulacji. Ogólnie opady w cyrkulacji cyklonalnej są prawie dwukrotnie wydajniejsze niż w cyrkulacji antycyklonalnej.

Rozpatrzono prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia opadu ciekłego w każdym z 21 typów cyrkulacji na tle ogólnego prawdopodobieństwa opadu bez względu na jego postać i typ (rys. 4.11). Taki obraz nie dotyczy lata, kiedy opady są wyłącznie w postaci ciekłej. Wtedy też w każdym z typów cyrkulacji cyklonalnej prawdopodobieństwo opadów przekracza 50%, a największe jest w 4 typach: Nc, NEc, Cc i Bc – około 75–80%. Bezwzględnie największe prawdopodobieństwo opadu ciekłego uzyskano w typie Cc – 86%. W porach przejściowych, ze względu na występowanie również innych typów opadów, prawdopodobieństwo opadów ciekłych jest mniejsze. Tym niemniej daje się zauważyć, że wiosną i jesienią w typach cyrkulacji z adwekcją mas powietrznych z sektora południowego opady ciekłe stanowią prawie 100% wszystkich opadów w nich występujących. Przeciwnie jest w typach z adwekcją mas powietrza z sektora północnego. Wiosną najbardziej sprzyja występowaniu opadów typ Cc i Bc; prawdopodobieństwo wynosi odpowiednio

Tabela 4.11. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów ciekłych oraz ich błędy standardowe w typach cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej (1874–2008)

Table 4.11. Conditional probability and daily totals of liquid precipitation and their standard errors for cyclonic and anticyclonic circulation types (1874–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
			Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	a	c	a		c	
III–V	19,3 ± 0,6	50,1 ± 0,9	2,6 ± 0,1	55,3	4,4 ± 0,1	83,9
VI–VIII	28,7 ± 0,7	70,4 ± 1,1	4,3 ± 0,2	61,0	7,3 ± 0,2	85,2
IX–XI	22,8 ± 0,6	59,6 ± 1,1	2,4 ± 0,1	33,4	4,6 ± 0,1	99,0
XII–II	10,4 ± 0,4	24,1 ± 0,7	1,6 ± 0,1	16,6	2,6 ± 0,1	21,2



Rys. 4.11. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu ciekłego (A) i prawdopodobieństwo warunkowe wszystkich opadów (B) i ich błędy standardowe w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 4.11. Conditional probability (%) of liquid precipitation (A) and conditional probability of all precipitation (B) and their standard errors by circulation type (1874–2008)

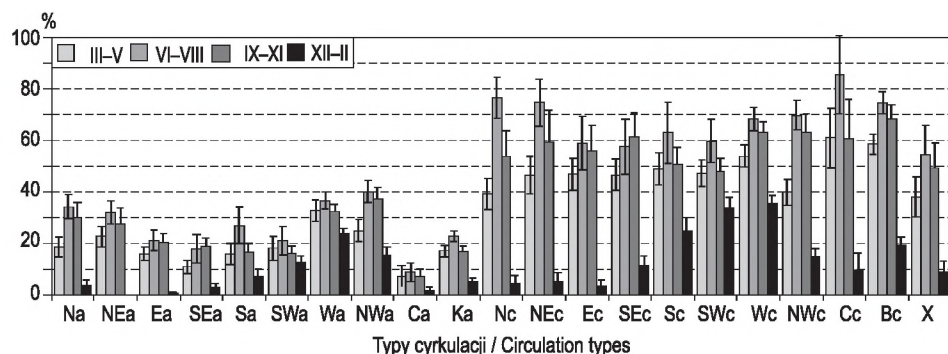
61 i 58%. Jesienią nie ma jednoznacznie dominującego pod tym względem typu cyrkulacji. Zdecydowanie najmniej korzystne warunki dla wystąpienia opadów w ogóle są w typie Ca.

Wyraźnie odmienny obraz prawdopodobieństwa opadów ciekłych występuje w zimie. W typie cyrkulacji antycyklonalnej NEa nie stwierdza się opadów ciekłych w ogóle, a w typach adwekcyjnych z kierunków N, NE i E oraz typach bezadwekcyjnych Ca i Ka ich poziom nie przekracza 5%. Największe prawdopodobieństwo opadów ciekłych jest w typach cyklonalnych SWc – 34% i Wc – 35%, a więc w typach sprowadzających ciepłe masy powietrzne.

Prawdopodobieństwo warunkowe występowania opadów ciekłych z 95% przedziałem ufności w każdym typie cyrkulacji w porach roku pokazano na rysunku 4.12. Widać, że tylko w typie SWa prawdopodobieństwo opadów ciekłych we wszystkich porach roku nie różni się istotnie statystycznie. W typach cyrkulacji NEa, Ea, SWa, Wa, Ca, Ec, SEc, Sc, SWc i Cc prawdopodobieństwo opadów ciekłych wiosną, latem i jesienią również nie wykazuje statystycznie istotnie różnych wartości.

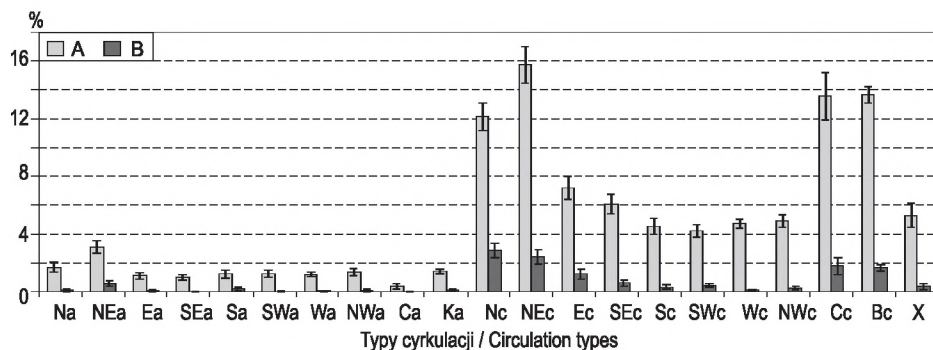
Opady silne i bardzo silne wykazują związek tylko z niektórymi typami cyrkulacji (rys. 4.13). W obu przypadkach są to 4 typy cyrkulacji: Nc, NEc, Cc i Bc.

Zakres wahań opadów w poszczególnych typach cyrkulacji jest bardzo duży (rys. 4.14). Największy opad dobowy, jaki wystąpił w rozpatrywanym okresie, wyniósł 99 mm; pojawił się on 9 września 1963 roku w typie cyrkulacji Ec. Prawie w każdym typie cyrkulacji pojawiają się opady silne (≥ 10 mm). Ogólnie, najwyższe średnie sumy opadów są w tych typach cyrkulacji, w których jest duże prawdopodobieństwo wystąpienia opadu (rys. 4.15), latem i w porach przejściowych są to więc typy: Nc, NEc, Cc i Bc. W lecie największy średni dobowy opad występuje w typie Nc – 9,7 mm, wiosną i jesienią zaś w typie NEc – odpowiednio 7,7 i 8,1 mm. Opady związane z cyrkulacją cyklonalną Nc i NEc były przyczyną powodzi, które występowały w południowej Polsce (m.in. Twardosz i Niedźwiedź, 2001; Twardosz, 2005b).



Rys. 4.12. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu ciekłego i jego 95% przedział ufności w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 4.12. Conditional probability (%) of liquid precipitation and its 95% confidence intervals by circulation type (1874–2008)



Rys. 4.13. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu ciekłego ≥ 10 mm (A) i ≥ 30 mm (B) i jego 95% przedział ufności w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 4.13. Conditional probabilities (%) of liquid precipitation ≥ 10 mm and ≥ 30 mm and their 95% confidence intervals by circulation type (1874–2008)

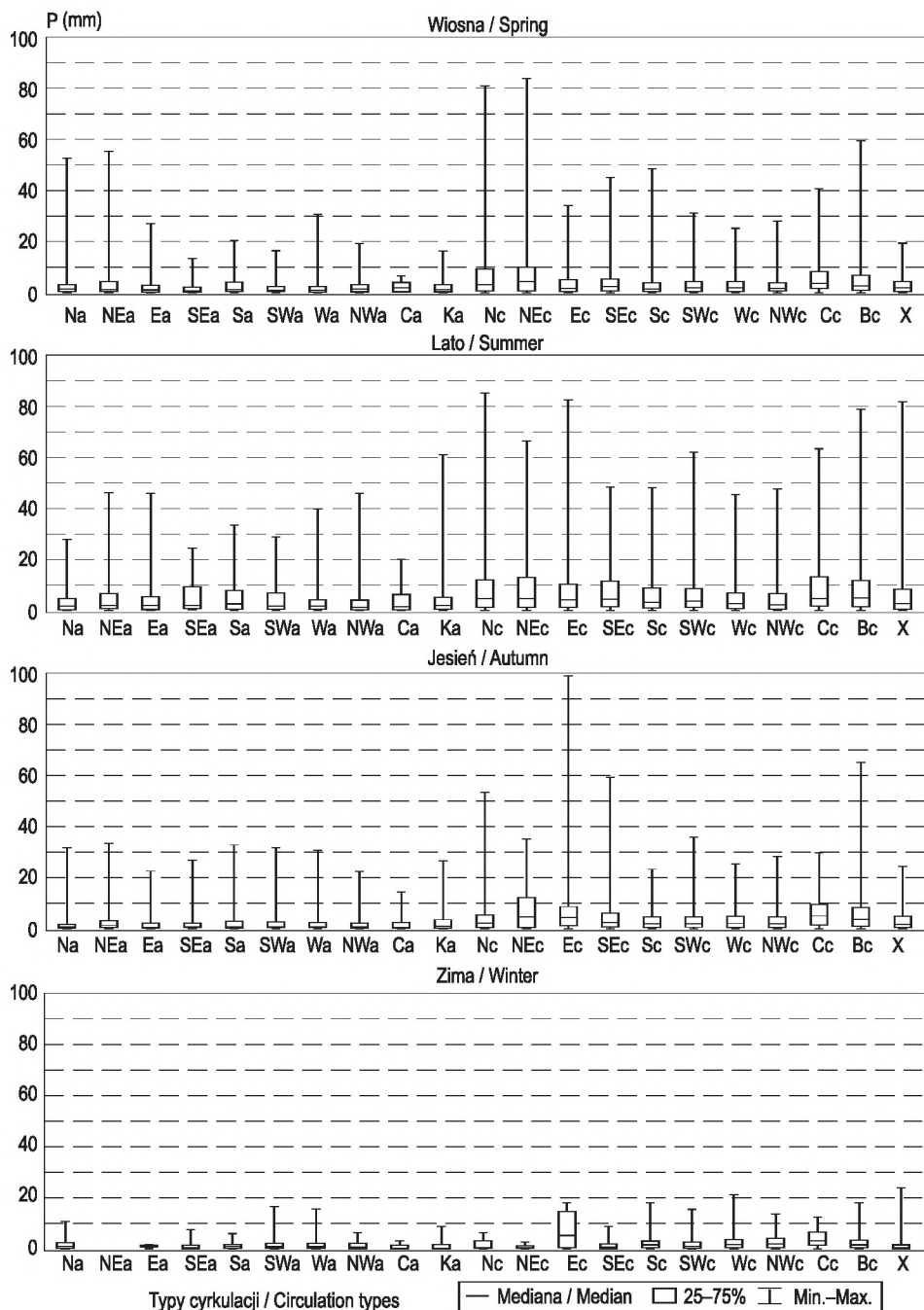
Powstawaniu opadów o dużej wydajności w Polsce Południowej sprzyja bariera orograficzna Karpat. W czasie adwekcji mas powietrza z kwadrantu północnego dochodzi do ich spiętrzania nad obszarem górskim, co powoduje długotrwałe opady zarówno w górach, jak i na ich przedpolu, a więc i w Krakowie. W zimie zdecydowanie największe sumy opadów ciekłych występują w typie Ec. Ze względu na małą próbę statystyczną danych (8 dni z opadem ciekłym) błąd średniej sumy jest bardzo duży.

W wielu typach cyrkulacji średnie sumy opadów nie wykazują istotnego zróżnicowania wartości zarówno w danej porze roku, jak i między porami roku.

Opady ciekłe, jak zostało to pokazane w tabeli 4.3, mają największy udział w rocznej sumie opadów – 82,3%. Największy wkład do rocznej sumy opadów wnoszą opady ciekłe występujące w typie cyrkulacji Bc – 20% i Wc – 12%, a więc w tych typach, które często występują i odznaczają się dużym prawdopodobieństwem pojawienia się opadu (rys. 4.16). Typy cyrkulacji cyklonalnej z sektora północnego wnoszą po około 5% sumy rocznej opadu. Istnieje duże zróżnicowanie sezonowe tego udziału – latem jest największy, a najmniejszy w zimie. W zimie przy cyrkulacji z północy następuje ochłodzenie i tworzą się warunki do wystąpienia opadów śnieżnych. Największy wkład opadów ciekłych do sumy rocznej w zimie mają opady w typie Wc – 1,7%.

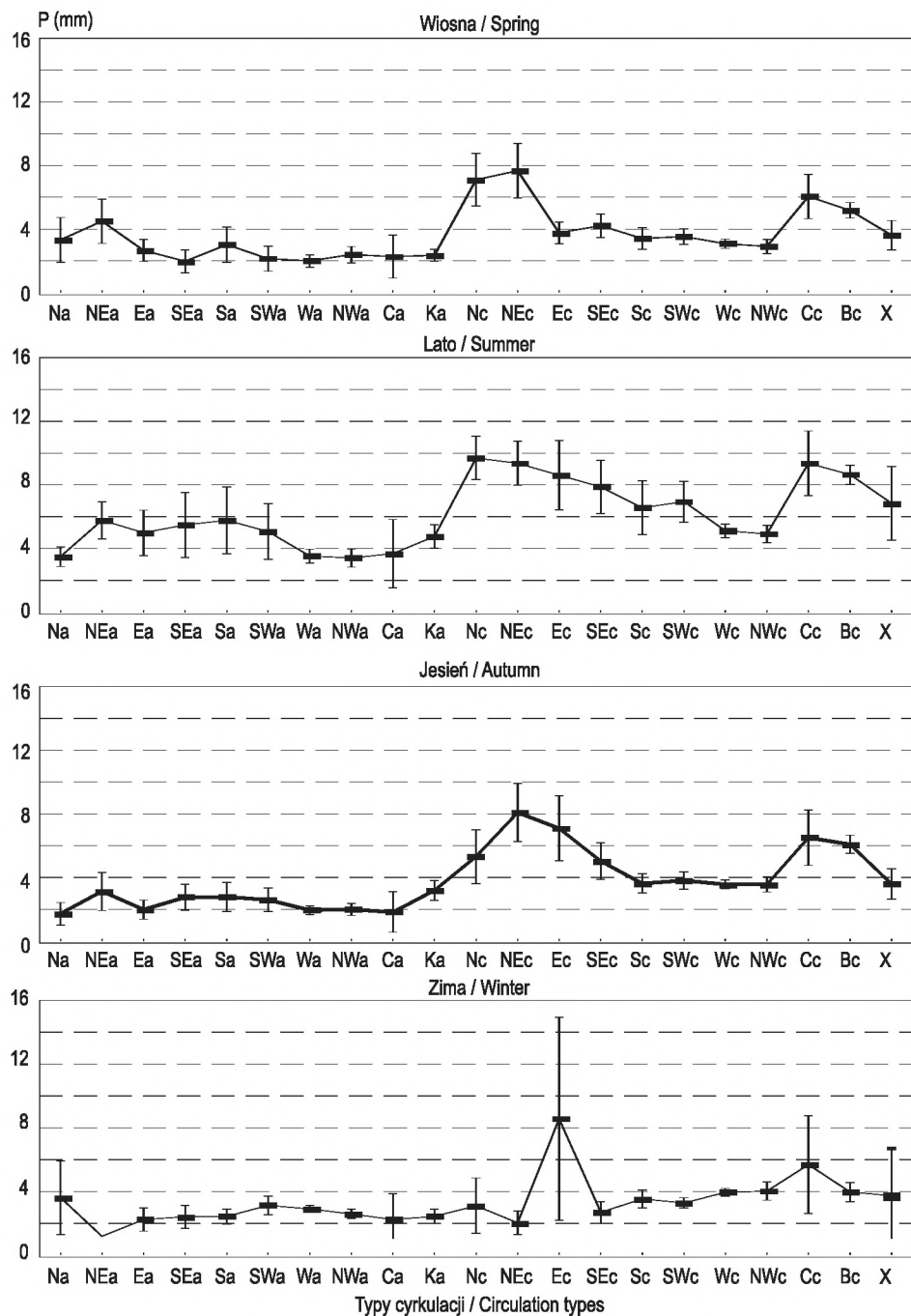
4.4.2. Związek opadów ciekłych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi

Występowanie opadów ciekłych w Krakowie powiązano z typami mas powietrznych w Polsce Południowej. Zróżnicowanie wielkości prawdopodobieństwa opadu ciekłego w masach powietrznych z rozróżnieniem na porę roku pokazano na rysunku 4.17. Widać, że w porach roku zróżnicowanie prawdopodobieństwa warunkowe-



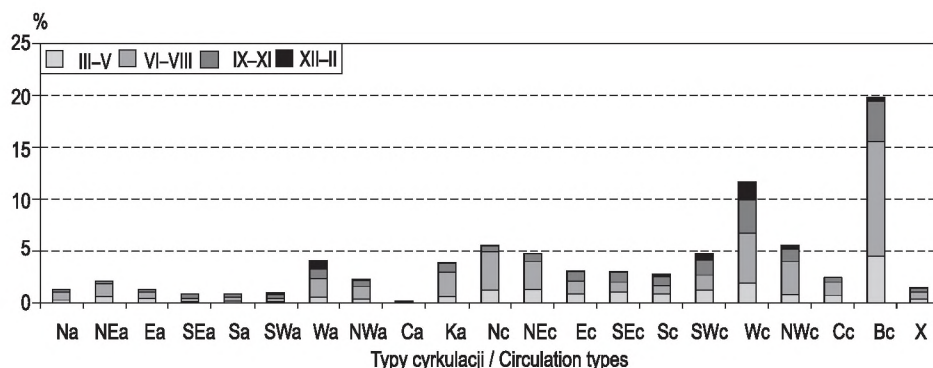
Rys. 4.14. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów ciekłych w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 4.14. Statistical characteristics of daily liquid precipitation totals by circulation type (1874–2008)



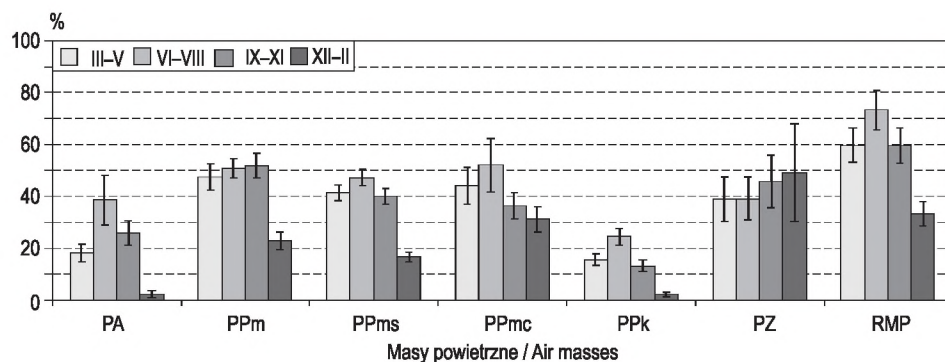
Rys. 4.15. Średnie dobowe sumy opadów ciekłych i ich 95% przedział ufności w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 4.15. Average daily totals of liquid precipitation and their 95% confidence intervals by circulation type (1874–2008)



Rys. 4.16. Udział (%) sum opadów ciekłych według typów cyrkulacji w rocznej sumie opadów (1874–2008)

Fig. 4.16. Contribution (%) of liquid precipitation to the annual precipitation total by circulation type (1874–2008)



Rys. 4.17. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu ciekłego i jego 95% przedział ufności w masach powietrznych (1951–2008)

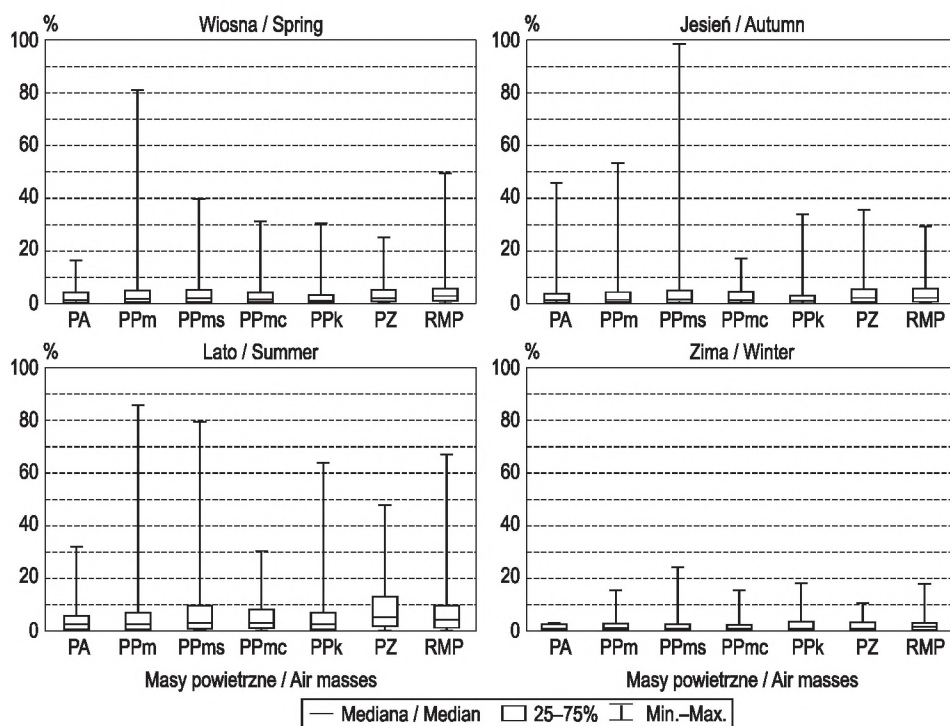
Fig. 4.17. Conditional probability (%) of liquid precipitation and its 95% confidence intervals by air masses (1951–2008)

go wystąpienia opadu jest bardzo duże w zależności od masy powietrznej. W zimie waha się ono od 2% w powietrzu PA i PPK do 33% w dniach ze zmianą masy, a latem od 24% w powietrzu PPK do 73% w dniach ze zmianą masy. W dniach ze zmianą masy jest duże prawdopodobieństwo opadu także w porach przejściowych, po 60%. Większej częstości występowania opadów w dniach z więcej niż jedną masą powietrzną sprzyja konwekcja dynamiczna w strefie frontów atmosferycznych oddzielających różne masy. W zimie w każdym typie masy powietrznej wystąpienie opadu ciekłego jest najmniej prawdopodobne, z wyjątkiem powietrza PZ. W powietrzu zwrotnikowym nie stwierdza się statystycznie różnych wartości prawdopo-

bieństwa opadu ciekłego w poszczególnych porach roku. W masach powietrza PPK prawdopodobieństwo opadu ciekłego stanowi około połowy tego, co w powietrzu polarnym morskim (PPm, PPms, PPmc). Ogólnie, małe prawdopodobieństwo opadu jest także w masach powietrza PA, z wyjątkiem lata.

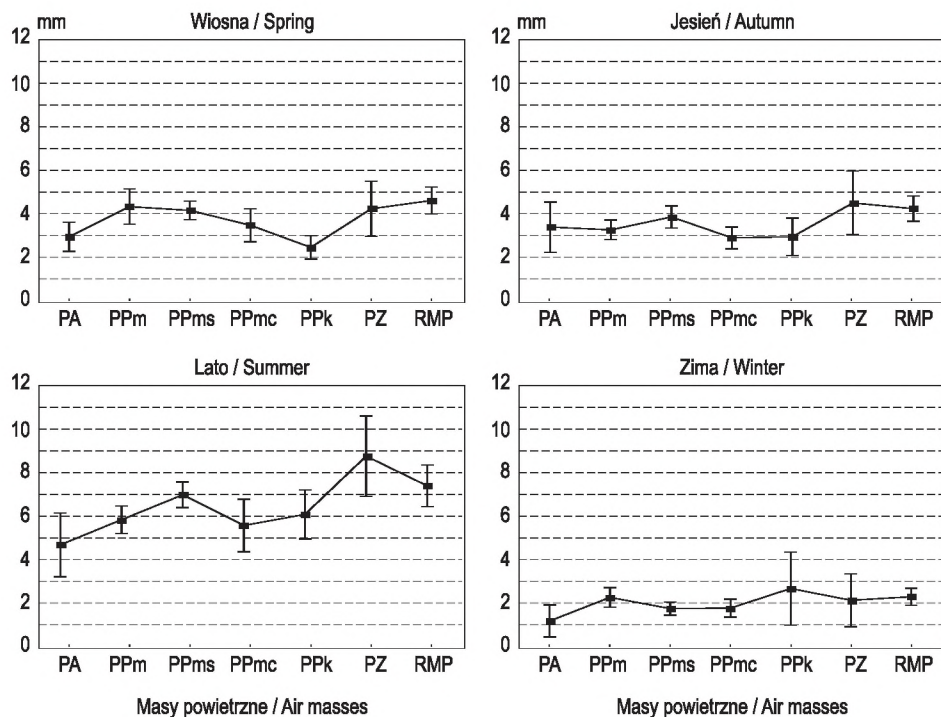
Zakres zmienności sum dobowych opadów ciekłych w poszczególnych masach powietrznych jest bardzo duży (rys. 4.18). W każdym typie masy, bez względu na porę roku, mogą występować silne opady, z wyjątkiem powietrza PA w zimie. Największe sumy opadów występują w powietrzu polarnym morskim. Słabiej różnicują się średnie sumy opadów ciekłych w poszczególnych masach w porach roku (rys. 4.19). Wyraźnie większe zróżnicowanie w średnich sumach zaznacza się tylko w lecie; najmniejsza średnia suma występuje w masie PA – 4,5 mm, a największa w masie PZ – 8,8 mm.

Porównano charakterystyki opadów w podziale na opady frontowe i wewnątrz-masowe, czyli takie, które występują w dniach, kiedy nad Polską Południową nie przechodził front atmosferyczny (tab. 4.12). Przemierzające się znad Atlantyku nad Europę nize mają rozbudowany system frontów atmosferycznych, co sprzyja występowaniu opadów. Prawdopodobieństwo opadu ciekłego frontowego, bez względu



Rys. 4.18. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów ciekłych w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 4.18. Statistical characteristics of daily liquid precipitation totals by air mass (1951–2008)



Rys. 4.19. Średnie dobowe sumy opadów ciekłych i ich 95% przedział ufności w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 4.19. Average daily totals of liquid precipitation and their 95% confidence intervals by air mass (1951–2008)

Tabela 4.12. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów ciekłych wewnątrzmasowych i frontowych oraz ich błędy standardowe (1951–2008)

Table. 4.12. Conditional probability and daily totals of liquid precipitation of air mass and frontal types and their standard errors (1951–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
	Opady / Precipitation		Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	wewnątrzmasowe air-mass	frontowe frontal	wewnątrzmasowe air-mass		frontowe frontal	
III–V	22,4 ± 0,8	54,2 ± 4,1	3,6 ± 0,2	81,0	4,2 ± 0,2	49,4
VI–VIII	34,1 ± 1,0	64,4 ± 4,8	5,2 ± 0,2	85,2	7,4 ± 0,3	66,5
IX–XI	25,1 ± 0,9	69,1 ± 4,2	2,9 ± 0,2	38,8	4,2 ± 0,2	99,0
XII–II	8,9 ± 0,5	26,6 ± 2,9	1,8 ± 0,1	16,6	2,3 ± 0,1	24,0

na porę roku, jest o wiele większe niż opadu wewnątrzmasowego. Największe prawdopodobieństwo wystąpienia opadów ciekłych w sytuacjach frontowych zachodzi w jesieni – niemal 70%.

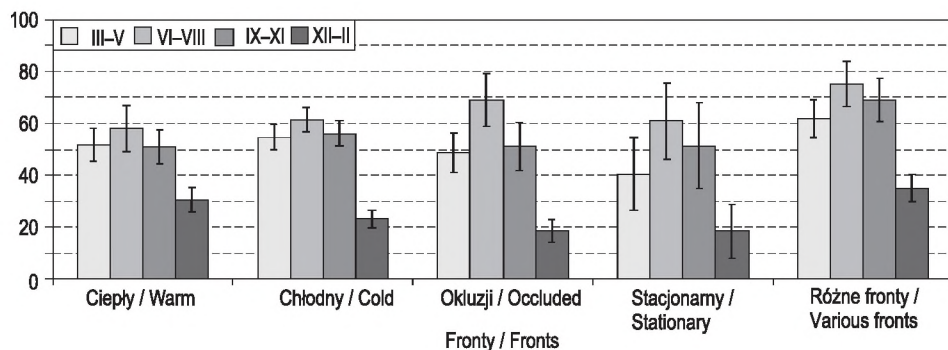
Opady frontowe, bez względu na ich typ, są bardziej wydajne niż wewnątrzmasowe, o czym decyduje większa zawartość pary wodnej w strefie frontów oraz ruchy wznoszące po powierzchni frontalnej. Pomimo że średnie sumy opadów wewnątrzmasowych są mniejsze od frontowych, to jednak mogą być z nimi związane największe sumy dobowe.

W przypadku opadów frontowych największe prawdopodobieństwo opadu ciekłego jest w dniach z różnymi frontami; w lecie wynosi ono 75% (rys. 4.20). Ogólnie prawdopodobieństwo to jest mało zróżnicowane ze względu na rodzaj frontu i nie stwierdza się wartości statystycznie różnych w lecie, wiosną i jesienią. W lecie obserwuje się także najmniejszy zakres zróżnicowania opadów przy poszczególnych rodzajach frontów, jesienią zaś największy (rys. 4.21). Najwyższe średnie sumy dobowe opadów ciekłych stwierdzono latem, ale nie różnią się istotnie przy poszczególnych rodzajach frontów (rys. 4.22).

4.4.3. Związek opadów ciekłych ze wskaźnikami cyrkulacji

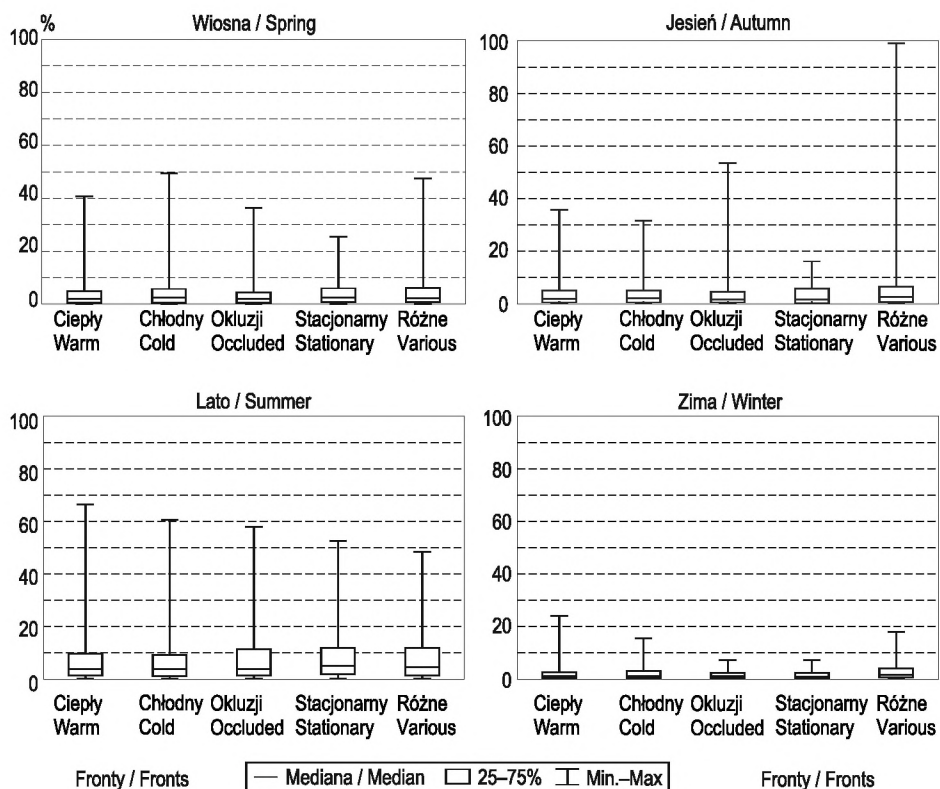
Wpływ cyrkulacji na opady ciekłe opisano także za pomocą wskaźników cyrkulacji atmosferycznej. Posłużono się znanym i często stosowanym wskaźnikiem cyrkulacji makroskalowej opisującym przepływ powietrza z zachodu – wskaźnikiem Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) i trzema regionalnymi wskaźnikami: cyrkulacji strefowej – W i południkowej – S oraz cykloniczności – C.

Wpływ Oscylacji Północnoatlantyckiej na opady w Europie Środkowej – jak dowodzą badania wielu autorów, np. Niedźwiedz i in. (2009) – jest najwyraźniejszy



Rys. 4.20. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu ciekłego i jego 95% przedział ufności na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 4.20. Conditional probability (%) of liquid precipitation and its 95% confidence intervals by type of front (1951–2008)

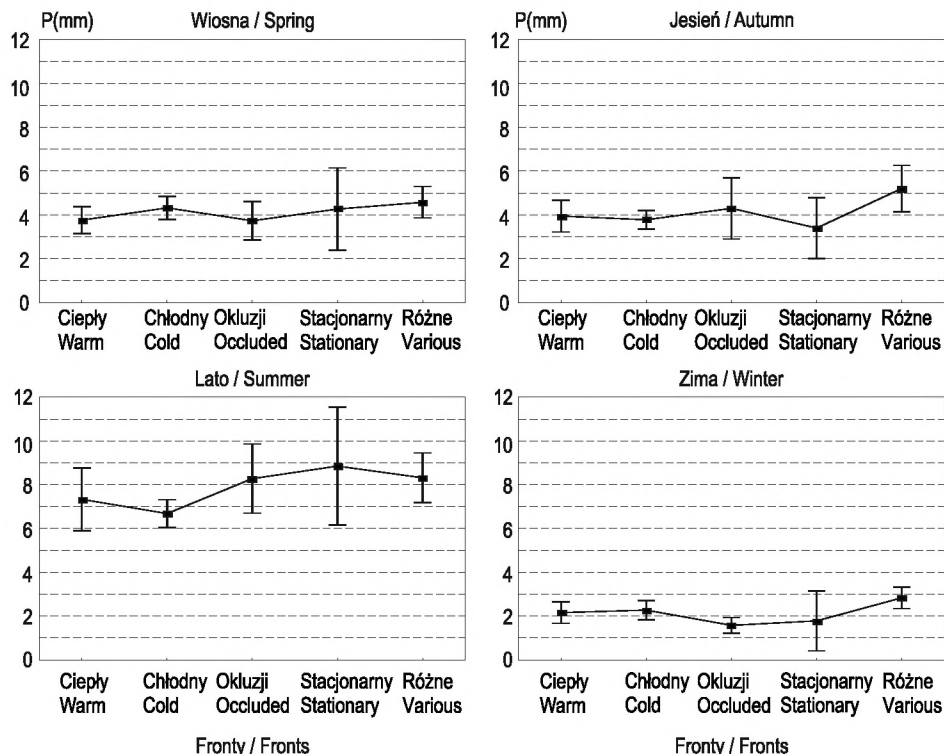


Rys. 4.21. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów ciekłych na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 4.21. Statistical characteristics of daily liquid precipitation totals by type of front (1951–2008)

w okresie zimowym, a więc w czasie, kiedy Oscylacja jest najbardziej wykształcona. W przypadku opadów ciekłych ze wskaźnikiem NAO istotnie koreluje zarówno liczba dni z opadem, jak i sumy opadów w miesiącach od listopada do kwietnia (tab. 4.13–4.14). Współczynniki korelacji są dodatnie, co oznacza, że wraz ze wzrostem wartości wskaźnika NAO wzrasta częstość i sumy opadów ciekłych. W miesiącach chłodnej połowy roku adwekcja z zachodu sprowadza cieplejsze i wilgotniejsze powietrze, co sprzyja występowaniu opadów ciekłych. Oscylacja Północnoatlantycka najlepiej wyjaśnia zmienność liczby dni z opadem ciekłym; w całej zimie wynosi 17%, a nawet 30% w styczniu.

Silniejsze związki korelacyjne opadów ciekłych uzyskano w przypadku regionalnych wskaźników cyrkulacji atmosferycznej – W i C. Związek opadów ze wskaźnikiem S jest wyraźnie słabszy, ale w niektórych miesiącach jest istotny statystycznie. Największą zależność liczby dni z opadem ciekłym od wskaźnika cyrkulacji zachodniej uzyskano w zimie, a od wskaźnika cykloniczności w jesieni (rys. 4.23). Wskaźnikiem W można objaśnić 35% zmienności dni z opadem ciekłym w styczniu,



Rys. 4.22. Średnie dobowe sumy opadów ciekłych i ich 95% przedział ufności na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 4.22. Average daily totals of liquid precipitation and their 95% confidence intervals by type of front (1951–2008)

Tabela 4.13. Współczynniki korelacji (r) między liczbą dni z opadem ciekłym a wskaźnikami cyrkulacji: R^2 – współczynnik determinacji, α – istotność współczynnika r (1874–2008)

Table 4.13. Correlation coefficients (r) between number of days with liquid precipitation and circulation indices: R^2 – coefficient of determination, α – statistical significance of r coefficient (1874–2008)

Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2
I	0,544	***	0,30	0,591	***	0,35	-0,135	–	0,02	0,104	–	0,01
II	0,454	***	0,21	0,571	***	0,33	0,032	–	0,00	0,169	–	0,03
III	0,287	***	0,08	0,361	***	0,13	0,125	–	0,02	0,393	***	0,15
IV	0,255	**	0,07	0,182	–	0,03	0,012	–	0,00	0,403	***	0,16
V	-0,035	–	0,00	0,199	*	0,04	-0,207	*	0,04	0,448	***	0,20
VI	-0,150	–	0,02	0,283	**	0,08	-0,157	–	0,02	0,481	***	0,23
VII	-0,141	–	0,02	0,268	**	0,07	-0,050	–	0,00	0,620	***	0,38
VIII	-0,106	–	0,01	0,195	*	0,04	-0,246	**	0,06	0,453	***	0,21

Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	<i>r</i>	α^1	R^2	<i>r</i>	α^1	R^2	<i>r</i>	α^1	R^2	<i>r</i>	α^1	R^2
IX	-0,285	***	0,08	0,230	**	0,05	-0,313	***	0,10	0,596	***	0,36
X	-0,016	—	0,00	0,245	**	0,06	-0,271	**	0,07	0,580	***	0,34
XI	0,185	*	0,03	0,255	**	0,07	0,158	—	0,02	0,459	***	0,21
XII	0,290	**	0,08	0,473	***	0,22	-0,029	—	0,00	0,337	***	0,11
III–V	0,209	**	0,04	0,210	**	0,04	0,019	—	0,00	0,417	***	0,17
VI–VIII	0,061	—	0,00	0,250	**	0,06	-0,162	—	0,03	0,446	***	0,20
IX–XI	0,005	—	0,00	0,236	**	0,06	-0,171	*	0,03	0,550	***	0,30
XII–II	0,417	***	0,17	0,546	***	0,30	0,013	—	0,00	0,192		0,04
I–XII	0,081	—	0,01	0,302	***	0,09	-0,100	—	0,01	0,294	**	0,09

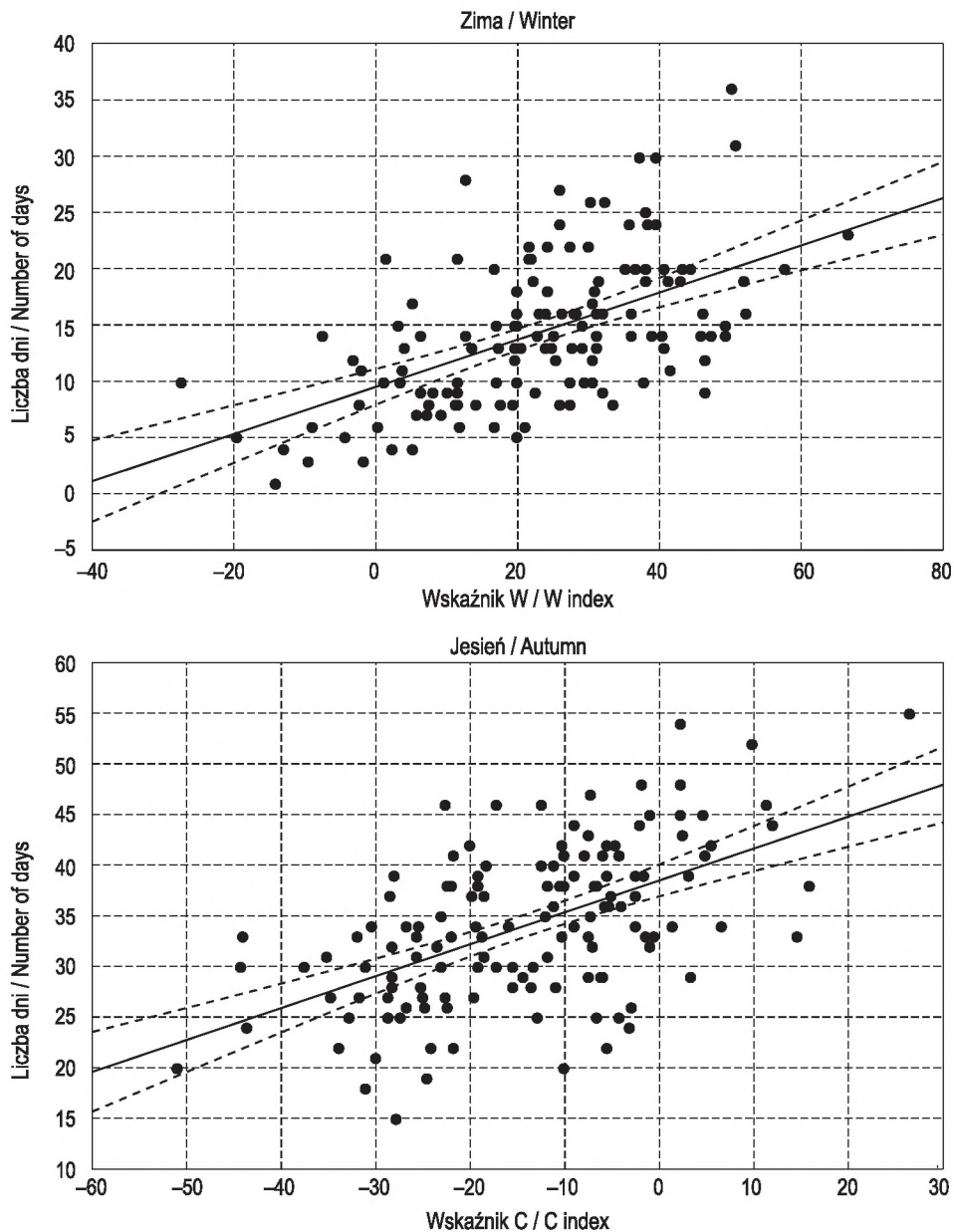
¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

Tabela 4.14. Współczynniki korelacji (*r*) między sumami opadów ciekłych a wskaźnikami cyrkulacji: R^2 – współczynnik determinacji, α – istotność współczynnika *r* (1874–2008)

Table 4.14. Correlation coefficients (*r*) between totals of liquid precipitation and circulation indices: R^2 – coefficient of determination, α – statistical significance of *r* coefficient (1874–2008)

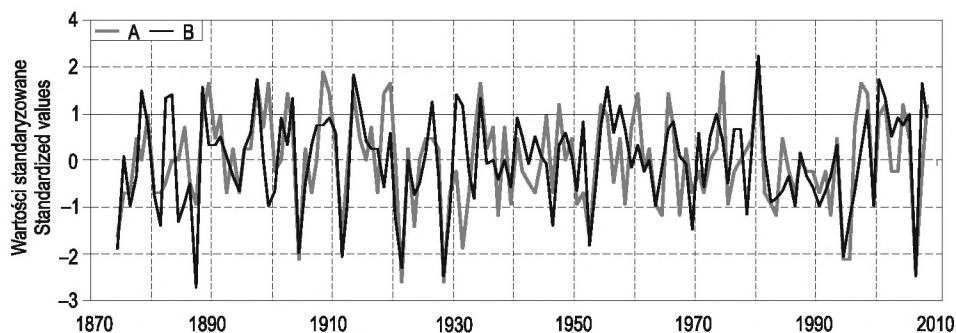
Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	<i>r</i>	α^1	R^2	<i>r</i>	α^1	R^2	<i>r</i>	α^1	R^2	<i>r</i>	α^1	R^2
I	0,419	***	0,18	0,453	***	0,21	-0,179	*	0,03	0,119		0,01
II	0,227	**	0,05	0,390	***	0,15	0,067	—	0,00	0,249	**	0,06
III	0,155	—	0,02	0,232	**	0,05	0,099	—	0,01	0,384	***	0,15
IV	0,109	—	0,01	0,020	—	0,00	0,001	—	0,00	0,362	***	0,13
V	0,078	—	0,01	-0,023	—	0,00	-0,203	**	0,04	0,228	**	0,05
VI	-0,082	—	0,01	-0,021	—	0,00	-0,169	—	0,03	0,370	***	0,14
VII	0,000	—	0,00	-0,026	—	0,00	-0,205	**	0,04	0,347	***	0,12
VIII	-0,091	—	0,01	0,019	—	0,00	-0,137	—	0,02	0,341	***	0,12
IX	-0,222	**	0,05	-0,103	—	0,01	-0,029	—	0,00	0,486	***	0,24
X	-0,064	—	0,00	0,168	—	0,03	-0,139	—	0,02	0,606	***	0,37
XI	0,147	—	0,02	0,269	**	0,07	0,107	—	0,01	0,385	***	0,15
XII	0,213	**	0,05	0,352	***	0,12	-0,033	—	0,00	0,347	***	0,12
III–V	0,095	—	0,01	0,075	—	0,01	-0,112	—	0,01	0,293	***	0,09
VI–VIII	0,047	—	0,00	-0,037	—	0,00	-0,096	—	0,01	0,310	***	0,10
IX–XI	0,005	—	0,00	0,126	—	0,02	-0,107	—	0,01	0,462	***	0,21
XII–II	0,206	**	0,04	0,371	***	0,14	0,061	—	0,00	0,241	**	0,06
I–XII	-0,06	—	0,00	0,011	—	0,00	0,033		0,00	0,286	***	0,08

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***



Rys. 4.23. Zależność liczby dni z opadem ciekłym w zimie od wskaźnika W (góra) oraz liczby dni z opadem ciekłym w jesieni od wskaźnika C (dół) i 95% przedział ufności linii regresji (1874–2008)

Fig. 4.23. Dependence of the number of days with liquid precipitation in winter on the W index (top) and of autumn liquid number of precipitation on the C index (bottom) and the 95% confidence intervals for the regression lines (1874–2008)



Rys. 4.24. Przebieg liczby dni z opadem ciekłym (A) i wskaźnika C (B) w lipcu; wartości standaryzowane (1874–2008)

Fig. 4.24. Variation of the number of days with liquid precipitation (A) and the C index (B) for July; standardized values (1874–2008)

a wskaźnikiem C 38% zmienności w lipcu. Graficzną postać związku opadów ciekłych ze wskaźnikiem cykloniczności pokazano na rysunku 4.24.

Podsumowując, zauważmy, że wskaźniki cyrkulacji są prostym, ale i syntetycznym sposobem opisu zmienności cyrkulacji i dobrze służą do wyjaśniania wariacji opadów w Europie Środkowej, zwłaszcza opadów ciekłych. Pomocne przy badaniu przyczyn zmienności klimatu są także wskaźniki cyrkulacji wyznaczone na podstawie typów cyrkulacji (Niedźwiedź, 2002).

5. OPADY ŚNIEGU

5.1. Okres występowania opadów śniegu

Charakterystykami opisującymi okres występowania opadów śniegu, który w dalszej części pracy będzie określany terminem „okres śnieżny”, są:

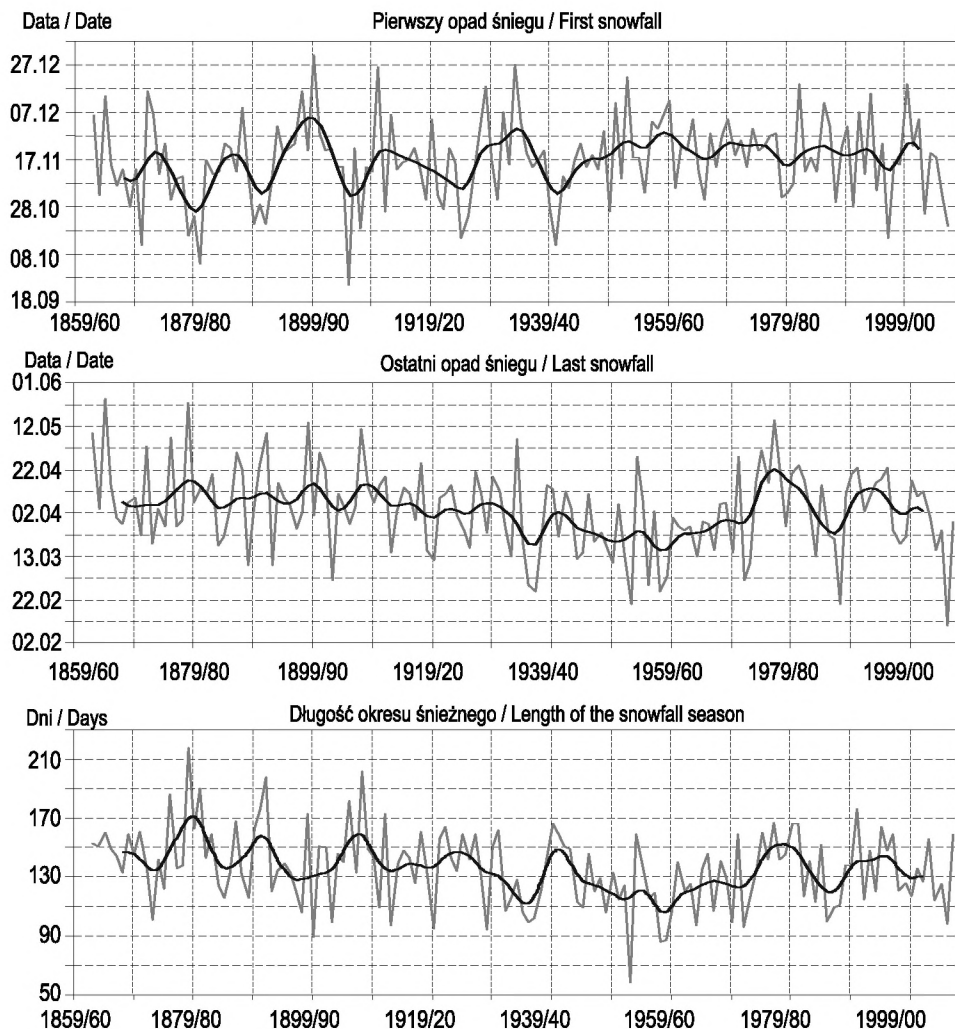
- data wystąpienia pierwszego opadu śniegu ($D_{p\dot{s}}$),
- data wystąpienia ostatniego opadu śniegu ($D_{o\dot{s}}$),
- długość okresu śnieżnego ($T_{\dot{s}}$), określona liczbą dni między pierwszym oraz ostatnim opadem śniegu w sezonie.

W Krakowie pierwsze opady śniegu występują średnio 17 listopada. Najwcześniejszy opad zanotowano 25 września (1906) i był to jedyny wrześniowy opad śniegu w badanym wieloleciu, najpóźniejszy zaś zdarzył się 31 grudnia (1900). Zakres zmian $D_{p\dot{s}}$ w Krakowie obejmuje zatem aż 97 dni. W badanym wieloleciu nie stwierdzono statystycznie istotnych długookresowych tendencji $D_{p\dot{s}}$ (rys. 5.1). W przebiegu wieloletnim tej daty występuje znaczna zmienność, szczególnie w XIX wieku i pierwszych trzech dekadach XX wieku. Od początku lat 40. XX stulecia do 2008 roku zakres zmian $D_{p\dot{s}}$ był o 32 dni mniejszy (65 dni) niż w okresie poprzedzającym (wspomniane 97 dni).

Kumulowane odchylenia (rys. 5.2) potwierdzają dużą zmienność daty występowania pierwszego opadu śniegu, można jedynie wskazać na przewagę dodatnich odchyień $D_{p\dot{s}}$ w okresie od początku lat 50. do końca XX wieku. Trend liniowy $D_{p\dot{s}}$ w całym wieloleciu jest statystycznie nieistotny (tab. 5.1).

W Krakowie ostatni opad śniegu pojawia się średnio 1 kwietnia, przy czym zakres zmian tej daty w badanym wieloleciu osiągnął 105 dni – od 7 lutego (2007) do 22 maja (1866). $D_{o\dot{s}}$ podlegała wyraźnym zmianom w badanym okresie (rys. 5.1). Od początku wielolecia aż do końca lat 50. XX wieku ostatni opad śniegu pojawiał się coraz wcześniej, np. w pierwszej dekadzie wielolecia średnio 12 kwietnia, a w latach 50. XX wieku – średnio 16 marca. Podobne tendencje zaobserwowano od początku lat 80. W latach 1950–1970 tendencja $D_{o\dot{s}}$ była przeciwna, np. w sezonie 1953/54 ostatni opad śnieżny był 17 lutego, a w sezonie 1977/78 12 maja. Ogólnie, w badanym wieloleciu stwierdzono statystycznie istotną tendencję do coraz wcześniejszego występowania ostatnich opadów śniegu o około 10 dni na stulecie (tab. 5.1).

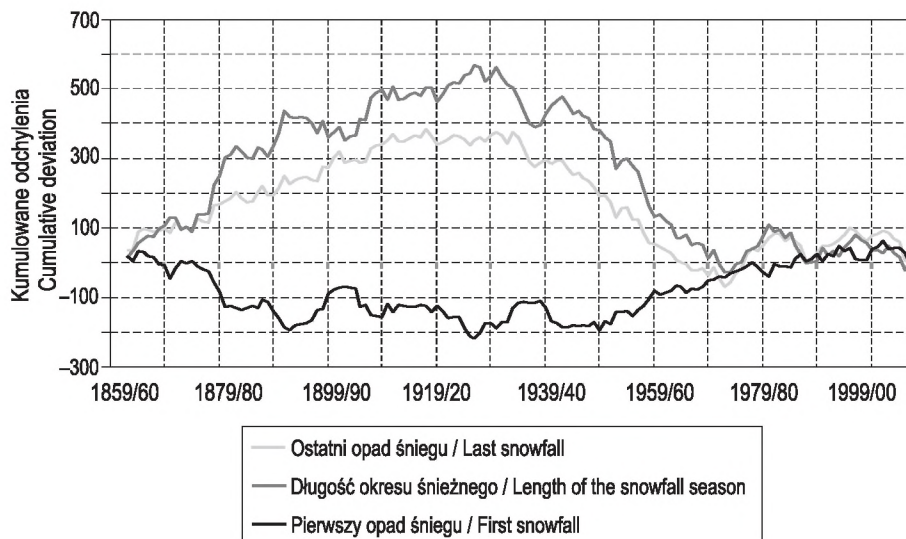
W Krakowie okres śnieżny trwa średnio 136 dni, przy czym w rozpatrywanym wieloleciu zmieniał się od 58 dni (1953/54) do 218 dni (1879/80). Potencjalny okres występowania opadów śniegu w Krakowie, wyznaczony przez najwcześniejszą datę pierwszego opadu śniegu (25 września) i najpóźniejszą datę ostatniego opadu śniegu



Rys. 5.1. Przebieg wieloletni charakterystyk okresu śnieżnego (data pierwszego i ostatniego opadu śniegu oraz długość okresu śnieżnego); wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 5.1. Variation of the snowfall season characteristics (date of the first and the last snowfall and the length of the snowfall season); values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)

(22 maja), wynosi 241 dni. W badanym wieloleciu dominuje tendencja do skracania się T_s . Okres śnieżny był najkrótszy w latach 50. XX wieku (112 dni – średni w okresie 1951/52–1959/60). Wielkość statystycznie istotnej tendencji spadkowej T_s w badanym wieloleciu wynosi około 15 dni na 100 lat (tab. 5.1). Zmiany T_s były silniej determinowane przez zmiany daty ostatniego niż pierwszego opadu śniegu w sezonie. Współczynnik korelacji między D_{os} i T_s wynosi 0,735, a zmiany D_{os}



Rys. 5.2. Kumulowane odchylenia charakterystyk okresu śnieżnego (data pierwszego i ostatniego opadu śniegu oraz długość okresu śnieżnego) od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 5.2. Cumulative deviations of the snowfall season characteristics (date of the first and the last snowfall and the length of the snowfall season) from the multiannual average (1863–2008)

Tabela 5.1. Współczynniki trendu charakterystyk okresu śnieżnego opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 5.1. Coefficient of trend of the snowfall season characteristics as described by linear regression on time (1863–2008)

Charakterystyka Characteristic	R^2	Współczynnik regresji (dni/100 lat) Regression coefficient (days/100 years)	p -wartość p -value
Data pierwszych opadów śniegu Date of first snowfall	0,013	$+4,8 \pm 3,4$	0,16
Data ostatnich opadów śniegu Date of last snowfall	0,046	$-9,8 \pm 3,7$	0,0093
Długość okresu śnieżnego Length of snowfall season	0,057	$-14,6 \pm 5,0$	0,0039

wyjaśniają aż 54% wariancji T_s . Przebiegi kumulowanych odchyłeń D_{os} oraz T_s od odpowiednich średnich wieloletnich (1863–2008) są podobne (rys. 5.2). Od początku rozpatrywanego wiekolecia do końca lat 20. XX wieku przeważały odchylenia dodatnie, a w okresie późniejszym, trwającym do końca lat 60. zdecydowanie dominowały odchylenia ujemne (rys. 5.2).

5.2. Występowanie i sumy opadów śniegu

Prawdopodobieństwo pojawienia się opadów śniegu w okresie od października do maja osiąga w Krakowie niecałe 11%, a w zimie wzrasta do ponad 23%; wartości prawdopodobieństwa warunkowego osiągają 25% w okresie od października do maja (dalej określanym jako okres śnieżny) i 47% w zimie. W każdym z miesięcy zimowych prawdopodobieństwo pojawienia się opadu w formie śnieżnej przekracza 20%, przy czym największe jest w styczniu (25,5%) (tab. 5.2). W styczniu i lutym opady śnieżne stanowią około połowy wszystkich dni z opadem (prawdopodobieństwo warunkowe odpowiednio 51,8 i 50,5%). W Krakowie opady w postaci śnieżnej występują także w porach przejściowych, przy czym są bardziej prawdopodobne na wiosnę (6,3%) niż jesienią (3,4%).

Tabela. 5.2. Liczba dni i prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu oraz ich błędy standardowe (1863–2008)

Table 5.2. Number of days and probability of snowfall and their standard errors (1863–2008)

Okres Period	Dni z opadem Number of days with precipitation			Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) Probability of occurrence (%)	
	Śr. / Av.	Min.	Max.	Wystąpienia ¹ Occurrence ¹	Warunkowe ² Conditional ²
I	7,8 ± 0,4	0	26	25,5 ± 1,2	51,8 ± 2,0
II	6,8 ± 0,4	0	19	24,5 ± 1,3	50,5 ± 2,2
III	4,7 ± 0,3	0	17	15,3 ± 0,9	32,8 ± 1,8
IV	0,9 ± 0,1	0	7	3,3 ± 0,4	6,9 ± 0,8
V	0,09 ± 0,03	0	3	0,3 ± 0,1	0,6 ± 0,2
...	–	–	–	–	–
IX	0,01 ± 0,01	0	1	0,02 ± 0,02	0,04 ± 0,004
X	0,2 ± 0,1	0	4	0,8 ± 0,2	1,6 ± 0,4
XI	2,8 ± 0,2	0	12	9,6 ± 0,8	18,3 ± 1,4
XII	6,2 ± 0,3	0	19	20,2 ± 1,0	40,5 ± 1,9
III–V	5,7 ± 0,3	0	18	6,3 ± 0,4	13,6 ± 0,7
VI–VIII	–	–	–	–	–
IX–XI	3,1 ± 0,2	0	12	3,4 ± 0,3	7,3 ± 0,6
XII–II	20,9 ± 0,7	2	52	23,4 ± 0,8	47,0 ± 1,4
X–V	29,7 ± 0,9	7,0	60,0	10,8 ± 0,3	25, 5 ± 0,7
VII–VI	29,7 ± 0,9	7,0	60,0	7,5 ± 0,2	17,3 ± 0,5

¹ liczone w stosunku do liczby dni w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days

² liczone w stosunku do liczby dni z opadem w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days with precipitation

Największą miesięczną liczbą dni z opadem śniegu w Krakowie wyróżnił się styczeń 1963 roku (tab. 5.2). Oprócz tego miesiąca liczba dni z opadem śniegu w styczniu jeszcze tylko raz w badanym wieloleciu przekroczyła 20 dni, a mianowicie w 1987 roku (21 dni). Warto w tym miejscu przypomnieć, że opady śniegu w styczniu pojawiają się średnio przez 8 dni. W pozostałych miesiącach zimowych (luty i grudzień), kiedy częstość opadów śniegu wynosi średnio 6,5 dnia, maksymalnie wystąpiło 19 dni z tym typem opadu (luty 1965 i grudzień 1969). Średnią oraz maksymalną liczbę dni z opadem śniegu we wszystkich uwzględnionych w opracowaniu okresach podano w tabeli 5.2.

Średnia suma opadów pojawiających się w postaci śnieżnej w okresie od października do maja wynosi 55 mm. W zimie ich wysokość osiąga 37,3 mm, a suma ta rozkłada się niemal równomiernie na 3 miesiące zimowe (tab. 5.3). Średnie sumy opadów śniegu w miesiącach zimowych różnią się istotnie ($\alpha < 0,000$) od średnich sum w marcu i listopadzie. Statystycznie istotna ($\alpha < 0,05$) jest także różnica między średnimi opadami w marcu (8,6 mm) i listopadzie (6,1 mm). Opady śnieżne pojawiające się wiosną dostarczają więcej wody opadowej (10,8 mm) niż występujące jesienią (7,0 mm). W rozpatrywanym wieloleciu najwyższą miesięczną sumę opadów śnieżnych zanotowano w grudniu 1874 roku (67,1 mm). Maksymalne sumy w pozostałych miesiącach zimowych osiągnęły 65,6 mm (luty 1952) i 50,1 (styczeń 1987); nawet w marcu i listopadzie przekroczyły 40 mm. Warto również zwrócić uwagę na wysoki opad śniegu w październiku 1926 roku, który osiągnął prawie 31 mm, podczas gdy średnia suma opadów śnieżnych w tym miesiącu wynosi zaledwie 0,9 mm. W badanym wieloleciu zakres zmian sum opadów śnieżnych w okresie śnieżnym, wyznaczony przez wartość maksymalną 137,8 mm (1874/75) i 4,2 mm oraz minimalną 4,2 mm (1924/25), osiągnął 133,6 mm.

Dobowe sumy opadów śniegu rzadko, nawet w miesiącach zimowych, przekraczają 10 mm. W całym badanym wieloleciu zdarzyło się tylko 89 takich przypadków, z czego najwięcej przypadło na grudzień (20 dni z opadem ≥ 10 mm), a następnie na marzec (17 takich dni). Prawdopodobieństwo wystąpienia dobowych opadów śnieżnych przekraczających 10 mm jest małe i w grudniu, lutym, marcu oraz w całej zimie wynosi 0,4%, a w listopadzie i styczniu 0,3%. W całym badanym wieloleciu zanotowano tylko jeden przypadek opadu śnieżnego przekraczającego 30,0 mm (31,1 mm), który wystąpił 22 listopada 1878 roku.

Przebieg roczny kwantyli sum opadów śnieżnych pokazano na rysunku 5.3. Sumy opadów śniegu o prawdopodobieństwie przewyższenia 90% są większe od 0 mm w miesiącach zimowych. Wielkość opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia 50% zmienia się od 2,1 mm w listopadzie do 10,3 mm w styczniu. Opady wysokie, występujące w Krakowie 10 razy na 100 lat ($p = 10\%$), są wyższe od 20 mm od grudnia do marca. W Krakowie tylko w grudniu i lutym raz na 100 lat ($p = 1\%$) miesięczne sumy opadów śnieżnych przekraczają 50 mm oraz są wyższe od 40 mm w styczniu (rys. 5.3).

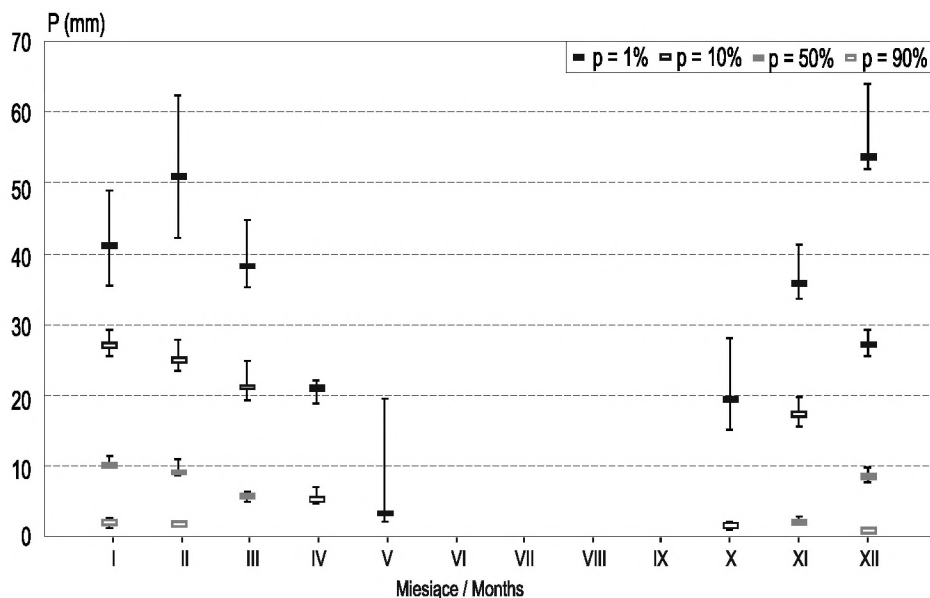
Udział opadów śniegu w ogólnej sumie opadów jest traktowany jako ważny wskaźnik zmian klimatu (Huntington i in., 2004). Opady śniegu stanowią nieco ponad 16% całkowitej sumy opadów okresu śnieżnego, przy czym w badanym wie-

Tabela. 5.3. Sumy opadów śniegu, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności, γ_1 – skośność (błąd standardowy skośności wynosi 0,2) (1863–2008)

Table 5.3. Totals of snowfall, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard deviation, V – variability coefficient, γ_1 – skewness (the standard error of skewness is 0.2) (1863–2008)

Okres Period	Suma / Totals (mm)			σ	V	γ_1
	Śr. / Av.	Min.	Max.	(mm)	(%)	
I	13,1 ± 0,9	0,0	50,1	10,4	79,1	1,0
II	12,1 ± 0,9	0,0	65,6	10,9	90,0	1,8
III	8,6 ± 0,8	0,0	46,5	9,3	107,9	1,6
IV	1,9 ± 0,3	0,0	22,1	4,1	215,4	3,2
V	0,2 ± 0,2	0,0	24,9	2,1	845,0	11,4
VI	–	–	–	–	–	–
VII	–	–	–	–	–	–
VIII	–	–	–	–	–	–
IX	0,04 ± 0,04	0,0	0,6	0,05	1208,3	12,1
X	0,9 ± 0,3	0,0	30,8	3,8	414,5	5,7
XI	6,1 ± 0,7	0,0	43,1	8,7	141,8	2,0
XII	12,0 ± 1,0	0,0	67,1	12,0	99,5	1,8
III–V	10,8 ± 0,8	0,0	46,5	9,8	90,6	1,1
VI–VIII	–	–	–	–	–	–
IX–XI	7,0 ± 0,8	0,0	43,1	9,6	137,2	1,8
XII–II	37,3 ± 1,7	0,5	102,6	21,1	56,5	0,8
X–V	55,0 ± 2,2	4,2	137,8	26,1	47,5	0,5
VII–VI	55,1 ± 2,2	4,2	137,8	26,2	47,4	0,5

lolecia udział ten zmieniał się od 2,1% (1924/25) do 47% (1874/75). Okazuje się, że w zimie, kiedy zdecydowana większość opadów ma postać stałą, stanowią one tylko 38,3% sumy ogólnej. Ich udział w przejściowych porach roku zmniejsza się do ponad 7% wiosną i do niecałych 5% jesienią. Udział opadów śnieżnych w sumach miesięcznych jest największy w lutym i styczniu, osiągając nie więcej niż 44% (tab. 5.4), co oznacza, że aż na około 56% sumy miesięcznej składają się pozostałe typy opadów. W styczniu 6 razy w badanym wieloleciu (1871, 1876, 1893, 1929, 1940, 1945) opady występowały tylko i wyłącznie w postaci śnieżnej (udział 100%), a w lutym 8 razy (1865, 1872, 1875, 1890, 1895, 1929, 1976, 1986). W grudniu opady śniegu przynoszą średnio 34% sumy miesięcznej. W badanym wieloleciu ich udział dwukrotnie osiągał 100% (1864, 1871). Jeszcze w marcu ponad 24% sumy opadów przypada na opady śniegu.



Rys. 5.3. Przebieg roczny kwantyli sum opadów śniegu i ich błąd standardowy (1863–2008)

Fig. 5.3. Annual distribution of snowfall quantiles and their standard errors (1863–2008)

Zdarzają się przypadki, że pomimo niewielkiego średniego udziału opadów śnieżnych w sumach ogólnych pojawiają się miesiące z bardzo dużym ich udziałem. Na przykład w marcu 1892 roku oraz trzykrotnie w listopadzie (1874, 1876, 1884) udział opadów śnieżnych w sumach miesięcznych przekroczył 90%. Nawet w październiku, kwietniu i maju, kiedy średnio tylko niecałe 5% sumy przypada na opad stały, zdarzały się lata, kiedy śnieg stanowił odpowiednio 68,3% (1908), 52,9% (1928) i 23,1% (1874) ogólnej sumy opadów. Warto zwrócić uwagę, że większość przytoczonych przykładów przypada na wiek XIX.

5.3. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów śniegu

W wieloletnim przebiegu liczby dni z opadem śniegu dominują silne wahania. W okresie śnieżnym oraz w porze zimowej liczba dni z opadem śniegu raczej fluktuuje wokół wartości średniej (rys. 5.4). W przejściowych porach roku, pomimo silnych wahań częstości opadów śniegu z roku na rok, zarysowują się pewne tendencje. Jesienią wartości wygładzone filtrem Gaussa wskazują na słaby wzrost liczby dni z opadem śniegu od początku lat 60. do końca XX wieku. Wiosną natomiast od początku badanego wielolecia do końca lat 70. XX wieku częstość opadów śniegu

Tabela 5.4. Udział (%) opadów śniegu w ogólnej sumie opadów (1863–2008)

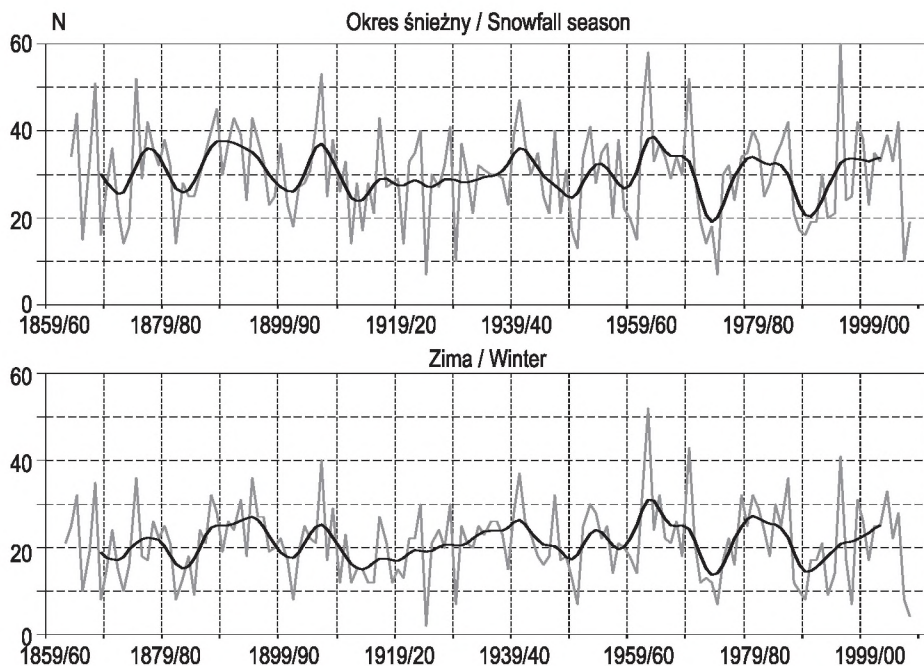
Table 5.4. Contribution (%) of snowfall to overall total precipitation and its standard error (1863–2008)

Okres Period	Śr. / Av.	Min. (%)	Max. (%)
I	41,5 ± 2,2	0,0	100,0
II	43,8 ± 2,5	0,0	100,0
III	24,4 ± 1,9	0,0	92,6
IV	4,2 ± 0,7	0,0	52,9
V	0,2 ± 0,2	0,0	23,1
VI	–	–	–
VII	–	–	–
VIII	–	–	–
IX	0,01 ± 0,01	0,0	0,7
X	1,7 ± 0,6	0,0	68,3
XI	14,8 ± 1,6	0,0	91,9
XII	34,1 ± 2,3	0,0	100,0
III–V	7,4 ± 0,6	0,0	32,0
VI–VIII	–	–	–
IX–XI	4,6 ± 0,5	0,0	29,0
XII–II	38,3 ± 1,6	1,1	87,5
X–V	16,3 ± 0,6	2,1	47,1
VII–VI	8,3 ± 0,4	0,6	25,4

ogólnie malała. Od początku lat 80. dni z opadem śniegu pojawiają się w Krakowie coraz częściej.

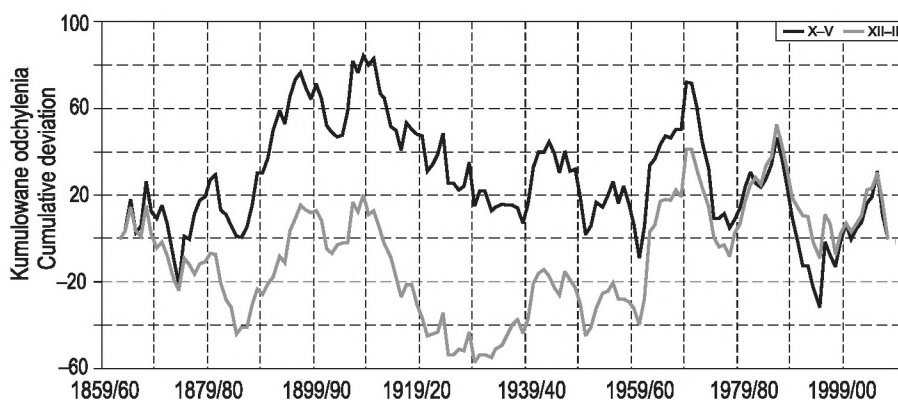
Kumulowane odchylenia od średniej liczby dni z opadem śniegu w okresie śnieżnym odznaczały się przewagą odchyłeń dodatnich od połowy lat 70. XIX wieku do końca pierwszej dekady XX wieku, przez całą pierwszą połowę XX wieku do końca lat 50. przeważały natomiast odchylenia ujemne. Od początku lat 60. zaznacza się jej duża zmienność. Podobnie kształtuje się przebieg występowania opadów śniegu w porze zimowej, z tym że okres przewagi odchyłeń ujemnych, rozpoczynający się na początku drugiej dekady XX wieku, trwa krócej, do końca lat 30., a następnie rozpoczyna się okres z przewagą odchyłeń dodatnich trwający do początku lat 70. (rys. 5.5).

W Krakowie kierunki trendów liniowych liczby dni z opadem śniegu są zróżnicowane w poszczególnych miesiącach i sezonach i w większości przypadków statystycznie nieistotne (tab. 5.5). W zimie oraz w styczniu i lutym współczynniki trendów liniowych są dodatnie, a w pozostałych okresach ujemne. Istotny spadek liczby dni z opadem śniegu stwierdzono w całej wiosnie (około $-1,7$ dnia/100 lat) i w kwietniu (około $-0,6$ dnia/100 lat), przy czym trend liniowy w tych okresach wyjaśnia jedynie



Rys. 5.4. Przebieg wieloletni liczby dni z opadem śniegu (N) w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 5.4. Variation of the number of days with snowfall (N) in snowfall season (Oct–May) and winter; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)



Rys. 5.5. Kumulowane odchylenia liczby dni z opadem śniegu w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 5.5. Cumulative deviations of the number of days with snowfall in snowfall season (Oct–May) and winter from the multiannual average (1863–2008)

Tabela. 5.5. Współczynniki trendu liczby dni z opadem śniegu opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 5.5. Coefficient of trend of the number of days with snowfall as described by linear regression on time (1863–2008)

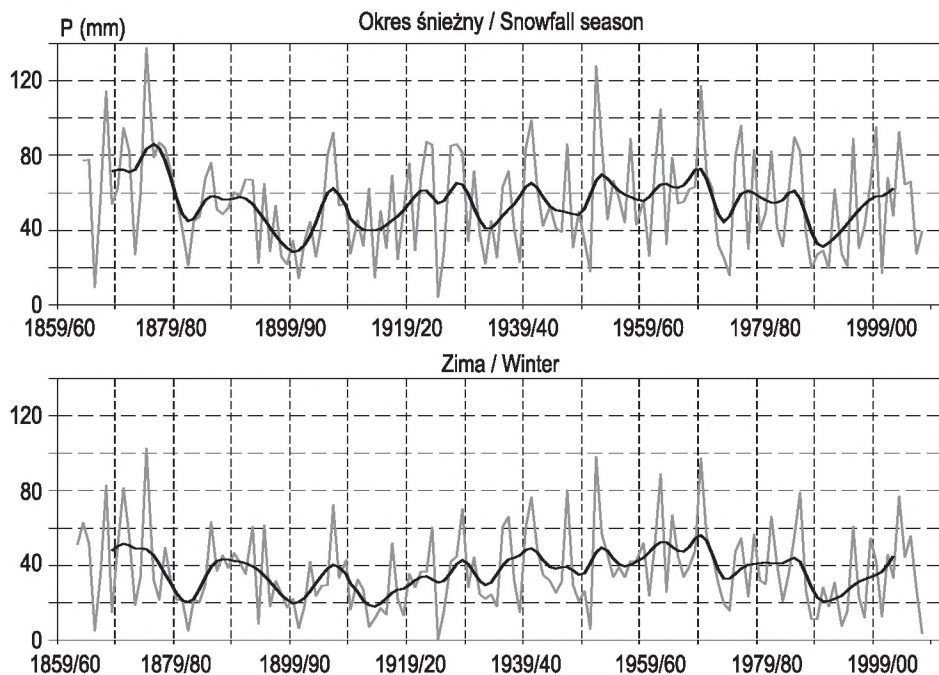
Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/100 lat) Regression coefficient (days/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,008	$+0,9 \pm 0,9$	0,28	—
II	0,002	$+0,5 \pm 0,9$	0,56	—
III	0,013	$-1,0 \pm 0,7$	0,16	—
IV	0,034	$-0,6 \pm 0,3$	0,027	*
...	—	—	—	—
XI	0,000	$-0,0 \pm 0,5$	0,95	—
XII	0,012	$-1,0 \pm 0,8$	0,18	—
III–V	0,034	$-1,7 \pm 0,8$	0,026	*
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,002	$-0,3 \pm 0,6$	0,57	—
XII–II	0,001	$+0,5 \pm 1,7$	0,77	—
X–V	0,004	$-1,6 \pm 2,0$	0,44	—
VII–VI	0,004	$-1,6 \pm 2,0$	0,43	—

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

3,4% wariancji. Istotność statystyczną trendu w kwietniu należy traktować ostrożnie ze względu na niską liczebność opadów śniegu w tym miesiącu.

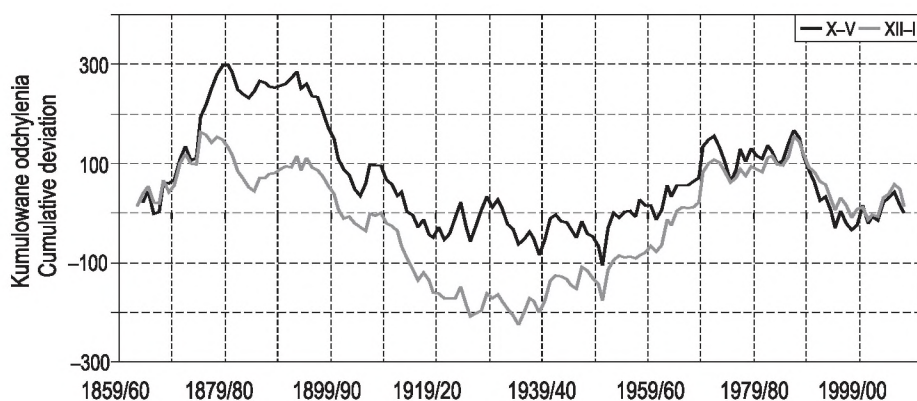
Wieloletni przebieg sum opadów śniegu (rys. 5.6) charakteryzuje się, podobnie jak przebieg liczby dni z opadem śniegu, dużą zmiennością, która dominuje nad pojawiającymi się trendami krótkookresowymi. Zmiany czasowe sum opadów śniegu w okresie śnieżnym i w zimie są podobne (rys. 5.6): w latach obejmujących XIX wiek zaznaczała się tendencja spadkowa, zdecydowanie wyraźniejsza w przypadku okresu śnieżnego niż pory zimowej. Od początku XX wieku do końca lat 60. sumy opadów śnieżnych wzrastały, przy czym tendencja ta wyraźniejsza była w zimie. W obydwóch okresach (X–V i XII–II) od początku lat 90. XX stulecia wysokość opadów śnieżnych ponownie wzrastała (rys. 5.6).

Kumulowane odchylenia od średniej sum opadów śniegu w zimie i okresie śnieżnym wskazują na zdecydowaną przewagę odchyleń ujemnych od początku lat 80. XIX wieku do końca lat 20. XX stulecia, a następnie na przewagę odchyleń dodatnich do połowy lat 80. XX wieku (rys. 5.7). Kierunek trendów liniowych sum opadów śniegu nawiązuje do kierunku trendów liczby dni z opadem śniegu, z wyjątkiem listopada (tab. 5.5 i 5.6). Statystycznie istotne są tylko tendencje spadkowe w kwietniu (około $-1,8$ dnia/100 lat), grudniu ($-4,6$ dnia/100 lat) oraz wiosną ($-4,7$ dnia/100 lat).



Rys. 5.6. Przebieg sum opadów śniegu w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 5.6. Variation of the snowfall totals in snowfall season (Oct–May) and winter; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)



Rys. 5.7. Kumulowane odchylenia sum opadów śniegu w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 5.7. Cumulative deviations of the total snowfall in snowfall season (Oct–May) and in winter from the multiannual average (1863–2008)

Tabela. 5.6. Współczynniki trendu sum opadów śniegu opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 5.6. Coefficient of trend of the totals of snowfall as described by linear regression on time (1863–2008)

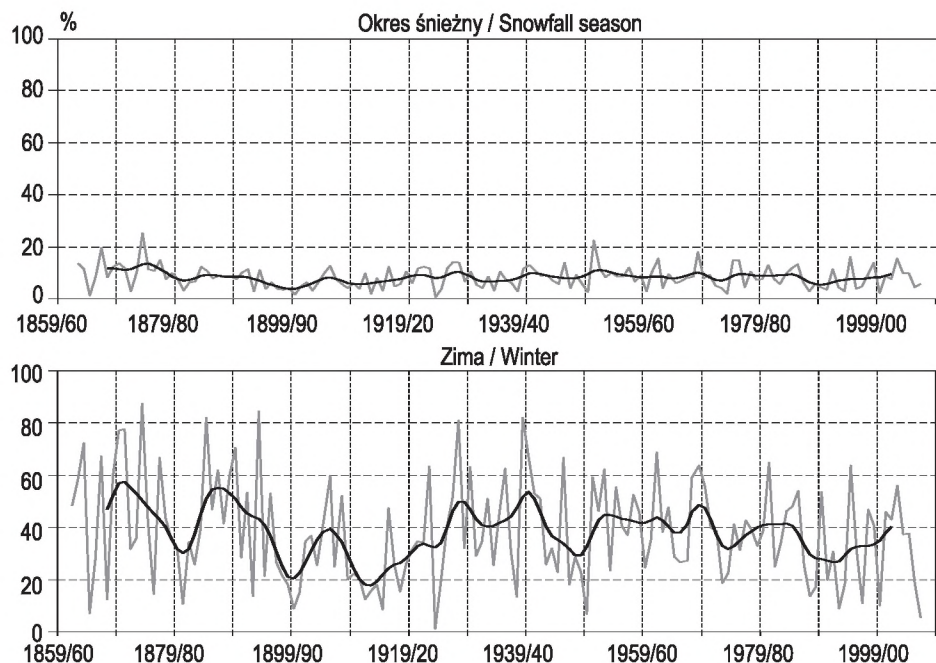
Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/100 lat) Regression coefficient (mm/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,011	$+2,5 \pm 2,0$	0,21	–
II	0,011	$+2,7 \pm 2,1$	0,20	–
III	0,018	$-2,9 \pm 1,8$	0,10	–
IV	0,044	$-1,8 \pm 0,7$	0,01	*
...
XI	0,000	$+0,4 \pm 1,7$	0,83	–
XII	0,027	$-4,6 \pm 2,3$	0,046	*
III–V	0,044	$-4,7 \pm 1,8$	0,011	*
IX–XI	0,002	$-0,9 \pm 1,9$	0,62	–
XII–II	0,000	$+0,6 \pm 4,2$	0,88	–
X–V	0,006	$-4,9 \pm 5,1$	0,33	–
VII–VI	0,008	$-5,4 \pm 5,1$	0,29	–

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Trend liniowy wyjaśnia jednak tylko 4,4% wariancji sum opadów śniegu w kwietniu i w całej wiosnie oraz 2,7% wariancji w grudniu.

W Krakowie stosunkowo dużej zmienności podlegał również udział opadów śnieżnych w ich sumach ogólnych. We wszystkich porach roku oraz w okresie śnieżnym wyraźna tendencja spadkowa zaznaczyła się tylko na początku badanego wielolecia, tj. w latach przypadających na wiek XIX, a w zimie obejmuje także pierwszą dekadę i połowę drugiej dekady XX wieku (rys. 5.8). We wspomnianych latach udział opadów śniegu w sumie ogólnej, wyznaczony na podstawie wartości wygładzonych filtrem Gaussa, zmieniał się od 13,3% (1874/75) do 3,9% (1900/01) w okresie śnieżnym, od 12,9% (1876) do 4,0% (1895) wiosną, od 57,5% (1870/71) do 17,7% zimą oraz od 13,6% (1876) do 0,7% (1899) jesienią. Ponadto na uwagę zasługuje również spadek udziału opadów śniegu w sumie opadów w zimie od początku lat 40. do początku lat 90. XX wieku (rys. 5.8).

Udział opadów śniegu w sumach ogólnych wykazuje tendencję ujemną we wszystkich rozpatrywanych okresach (tab. 5.7). Udział ten maleje istotnie tylko w grudniu ($-13,9\%$ /100 lat) oraz na wiosnę ($-3,3\%$ /100 lat). Współczynnik regresji jest stosunkowo wysoki w marcu, przy czym duża zmienność tego udziału w kolejnych latach wielolecia powoduje, że tendencja ta jest statystycznie nieistotna. Spadek udziału opadów śniegu w sumach ogólnych zaobserwowano również w Arktyce Norweskiej (Førland i Hanssen-Bauer, 2003), Nowej Anglii, na Syberii (Huntington i in., 2004) i w Kanadzie (Karl i in., 1993), a także w Anglii (IPCC, 2007).



Rys. 5.8. Przebieg udziału (%) opadów śniegu w ogólnej sumie opadów sezonu śnieżnego (X–V) i zimy; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 5.8. Variation in the contribution (%) of snowfall to the snowfall season (Oct–May) and winter precipitation totals; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)

Tabela 5.7. Współczynniki trendu udziału (%) opadów śniegu w ogólnej sumie opadów opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 5.7. Coefficient of trend of the contribution of snow precipitation (%) to overall total precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (%/100 lat) Regression coefficient (%/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,006	$-4,8 \pm 5,3$	0,36	—
II	0,001	$-2,0 \pm 6,1$	0,74	—
III	0,021	$-7,9 \pm 4,5$	0,078	—
IV	0,018	$-2,8 \pm 1,7$	0,10	—
...	—	—	—	—
XI	0,001	$-1,1 \pm 3,8$	0,77	—
XII	0,045	$-13,9 \pm 5,3$	0,0098	**
III–V	0,040	$-3,3 \pm 1,3$	0,015	*
IX–XI	0,001	$-0,5 \pm 1,2$	0,65	—
XII–II	0,017	$-6,0 \pm 3,8$	0,11	—
X–V	0,013	$-2,1 \pm 1,5$	0,17	—
VII–VI	0,004	$-0,7 \pm 0,8$	0,42	—

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

Wśród czynników determinujących występowanie opadów śniegu ważną rolę, oprócz wilgotności, odgrywa temperatura powietrza, która w ostatnich dekadach wyraźnie wzrasta. Szacuje się, że wzrost średniej globalnej rocznej temperatury w okresie 1906–2005 osiągnął $0,74^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$. Wielkość tendencji charakteryzuje się zmiennością przestrzenną i sezonową. Największe ocieplenie stwierdza się nad obszarami lądowymi półkuli północnej w zimie oraz na wiosnę (IPCC, 2007).

W Krakowie tendencje temperatury powietrza nawiązują do trendów globalnych. We wszystkich miesiącach obserwuje się istotny wzrost temperatury, który jest najsilniejszy w grudniu, co zostało pokazane w podrozdziale 4.2 tej pracy.

Zależności między charakterystykami opadów śnieżnych i temperaturą powietrza we wszystkich uwzględnionych okresach, z wyjątkiem zimy, są silnie statystycznie istotne – w zdecydowanej większości przypadków na poziomie $\alpha < 0,0001$. Wzrost temperatury powietrza powoduje spadek zarówno sum, liczby dni, jak i udziału opadów śnieżnych w sumach ogólnych.

Wyniki badań H. Ye (2008) wskazują, że w wyższych szerokościach geograficznych Eurazji zależności między częstością opadów śnieżnych i temperaturą w zimie są przeciwne – wzrost temperatury powietrza prowadzi do wzrostu częstości opadów śniegu, przy czym tracą one statystyczną istotność i ulegają zmianie na przeciwne w miarę przesuwania się na południe. Tendencje w przejściowych porach roku są podobne (Ye, 2008).

Należy pamiętać, że wielkość współczynnika regresji zależy od zakresu wartości rozpatrywanej zmiennej (charakterystyki) w danym sezonie, niemniej jednak można stwierdzić, że temperatura powietrza najsilniej wpływa na pojawianie się opadów śniegu w marcu (około -1 dzień na 1°C , co stanowi 20% średniej wieloletniej liczby dni z tym opadem). W marcu zmienność temperatury powietrza wyjaśnia ponad 43% wariancji liczby dni ze śniegiem (tab. 5.8). Częstość opadów śniegu istotnie maleje wraz ze wzrostem średniej temperatury również w zimie (o około 2,4 dnia na 1°C). W sezonie tym zmienność temperatury powietrza wyjaśnia ponad 41% wariancji częstości opadów śniegu. Wiosną jednostopniowy wzrost temperatury powoduje spadek liczby dni z opadem śnieżnym o około 1,5 dnia (26% średniej wieloletniej), przy czym w tym wypadku współczynnik determinacji osiąga tylko około 28%, wskazując, że około 72% wariancji jest determinowane przez inne czynniki i zmienność przypadkową. Pomimo wysokiej istotności statystycznej zależności regresyjne między sumą opadów śnieżnych i temperaturą powietrza są najsłabsze spośród badanych charakterystyk (w porównaniu z liczbą dni i udziałem w sumach ogólnych). Tylko w sezonie zimowym temperatura powietrza objaśnia ponad 32% wariancji sum opadów śniegu, które maleją o około 5 mm przy wzroście temperatury o 1°C . Miesięczna temperatura powietrza determinuje nie więcej niż 18% wariancji sum opadów śniegu (z wyjątkiem grudnia – prawie 20%), sezonowa jeszcze mniej (tab. 5.9). W grudniu wzrost temperatury o 1°C powoduje spadek wysokości opadów śnieżnych o około 2 mm. Stosunkowo duży spadek sum opadów śnieżnych na wzrost temperatury o jednostkę w okresie śnieżnym (ponad 9 mm/ 1°C) stanowi tylko 17% średniej wieloletniej sumy opadów śniegu. Temperatura powietrza najsilniej wpływa na udział opadów śniegu w sumach ogólnych. Współczynnik determinacji w tym wy-

Tabela 5.8. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność liczby dni z opadem śniegu od średniej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 5.8. Linear regression coefficients describing dependency of number of days with snowfall on average temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/°C) Regression coefficient (days/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,338	$-0,78 \pm 0,09$	0,0000	***
II	0,272	$-0,68 \pm 0,09$	0,0000	***
III	0,453	$-0,97 \pm 0,09$	0,0000	***
IV	0,199	$-0,35 \pm 0,06$	0,0000	***
...				
XI	0,352	$-0,77 \pm 0,09$	0,0000	***
XII	0,368	$-0,88 \pm 0,10$	0,0000	***
III–V	0,276	$-1,51 \pm 0,20$	0,0000	***
VI–VIII				
IX–XI	0,179	$-1,01 \pm 0,18$	0,0000	***
XII–II	0,414	$-2,36 \pm 0,23$	0,0000	***
X–V	0,316	$-4,42 \pm 0,54$	0,0000	***
VII–VI	0,254	$-5,19 \pm 0,75$	0,0000	***

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Tabela 5.9. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność sum opadów śniegu od średniej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 5.9. Linear regression coefficients describing dependency of total snowfall on average temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/°C) Regression coefficient (mm/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,173	$-1,29 \pm 0,23$	0,0000	***
II	0,176	$-1,34 \pm 0,24$	0,0000	***
III	0,176	$-1,59 \pm 0,29$	0,0000	***
IV	0,089	$-0,67 \pm 0,18$	0,0002	***
...				
XI	0,166	$-1,67 \pm 0,31$	0,0000	***
XII	0,199	$-2,00 \pm 0,33$	0,0000	***
III–V	0,126	$-2,54 \pm 0,56$	0,0000	***
VI–VIII				
IX–XI	0,080	$-2,27 \pm 0,64$	0,0005	***
XII–II	0,322	$-5,21 \pm 0,63$	0,0000	***
X–V	0,211	$-9,28 \pm 1,50$	0,0000	***
VII–VI	0,162	$-10,62 \pm 2,02$	0,0000	***

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

padku osiąga ponad 55% w lutym, przekracza 40% w styczniu i grudniu (tab. 5.10). W wymienionych miesiącach wielkość spadku udziału opadów śnieżnych w sumach ogólnych wynosi: 6,8%/1°C w grudniu i lutym oraz około 5,5%/1°C w styczniu, co stanowi odpowiednio 20, 15 i 13% średniego wieloletniego udziału. Zależności regresyjne między średnią sezonową temperaturą powietrza i udziałem opadów śniegu w sumach ogólnych są najsilniejsze zimą. W tej porze roku wielkość udziału opadów śniegu w sumach ogólnych zmniejsza się o około 6% wraz ze wzrostem średniej temperatury powietrza o 1°C. Zmienność średniej temperatury powietrza w zimie wyjaśnia ponad połowę wariancji udziału opadów śnieżnych w sumach ogólnych (współczynnik determinacji 54%). W pozostałych sezonach zależności regresyjne między średnią temperaturą i udziałem opadów śniegu w sumach ogólnych są zdecydowanie słabsze (tab. 5.10).

Rozpatrując związki występowania opadów śniegu z temperaturą powietrza, szczególnie w okresie zimowym, należy pamiętać, że są one dosyć skomplikowane i mają charakter regionalny. Badania takich relacji w sezonie zimowym w wyższych szerokościach Eurazji wskazują, że częstość opadów śniegu wzrasta wraz ze wzrostem temperatury powietrza, dopóki temperatura utrzymuje się poniżej pewnej wartości, która zależy od geograficznej lokalizacji (Ye i Mather, 1997; Davies i in., 1999).

Tabela 5.10. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność udziału opadów śniegu w ogólnej sumie opadów od średniej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 5.10. Linear regression coefficients describing dependency of the contribution of snowfall to overall total precipitation on average temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (%/°C) Regression coefficient (%/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,471	-5,50 ± 0,49	0,0000	***
II	0,553	-6,76 ± 0,51	0,0000	***
III	0,256	-4,71 ± 0,67	0,0000	***
IV	0,093	-1,42 ± 0,37	0,0002	***
...				
XI	0,272	-4,79 ± 0,65	0,0000	***
XII	0,422	-6,78 ± 0,66	0,0000	***
III–V	0,107	-1,66 ± 0,40	0,0001	***
VI–VIII				
IX–XI	0,070	-1,37 ± 0,41	0,0012	**
XII–II	0,536	-6,23 ± 0,48	0,0000	***
X–V	0,248	-3,00 ± 0,44	0,0000	***
VII–VI	0,146	-1,64 ± 0,33	0,0000	***

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

5.4. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady śniegu

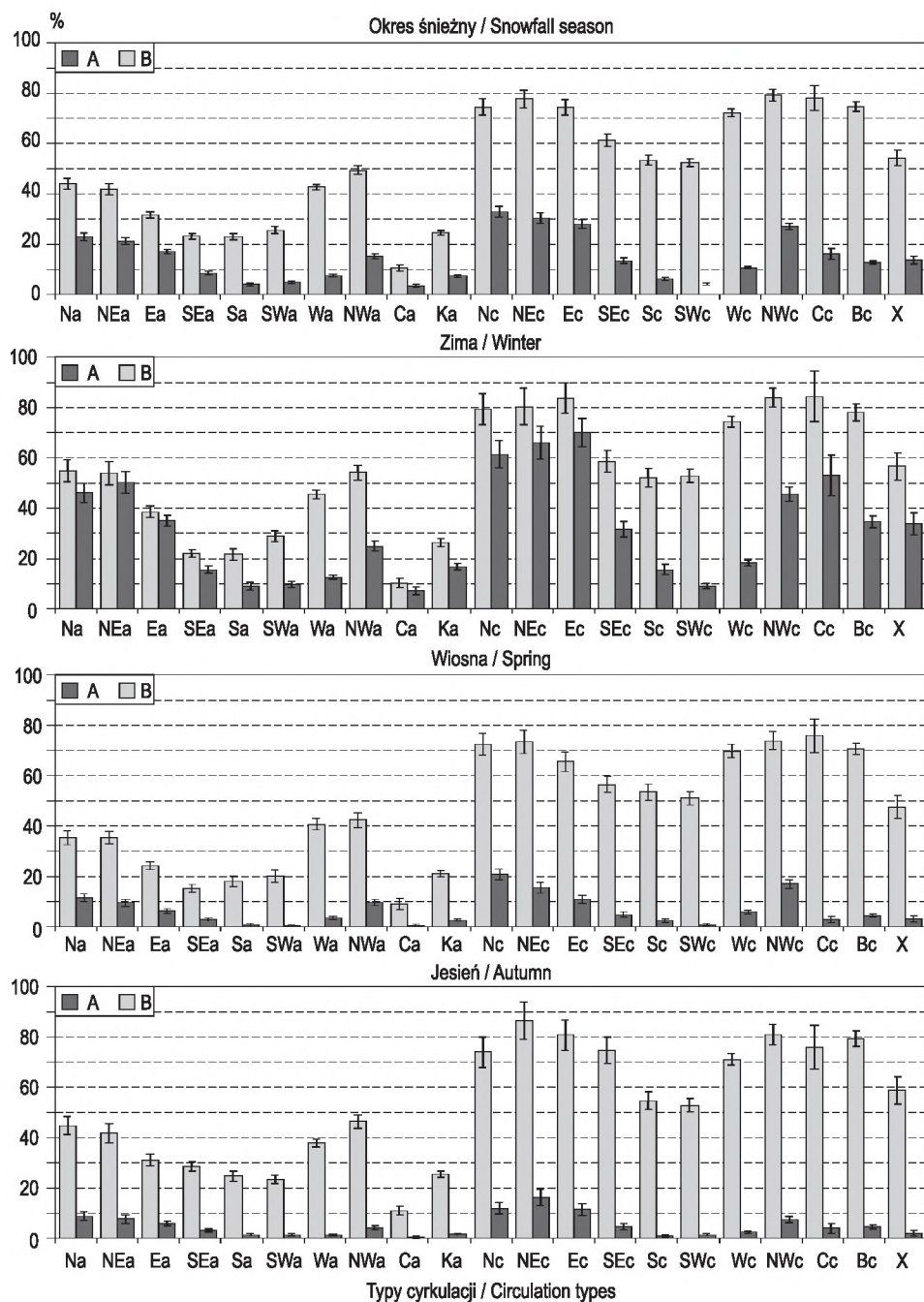
5.4.1. Związek opadów śniegu z typami cyrkulacji

W Krakowie występowanie opadów śniegu jest najbardziej prawdopodobne podczas napływu powietrza z sektora od N do E przy układzie niskiego ciśnienia. W okresie od października do maja prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu w typie Nc wynosi 32,9% i jest tylko nieznacznie większe niż w typach NEc (30,3%) i Ec (28,1%). Wymienione kierunki napływu powietrza nad południową Polskę charakteryzują się sporym, w porównaniu z innymi typami cyrkulacji, prawdopodobieństwem wystąpienia opadów śniegu nawet podczas oddziaływania układu wysokiego ciśnienia (rys. 5.9). W zimie możliwość wystąpienia opadów śniegu w dniach z wymienionymi typami cyklonalnymi wzrasta do 71% (Ec), 66% (NEc) i 61,5% (Nc), w typach antycyklonalnych zaś osiąga 35,1% (Ea), 50,2% (NEa), 46,1% (Na). Ponadto w zimie opady śniegu zdarzają się podczas 53% dni, w których nad Krakowem zalega centrum układu niżowego (Cc), oraz podczas 46% dni z typem NWc.

W przejściowych porach roku związki występowania opadów śniegu z typami cyrkulacji ogólnie kształtują się podobnie jak w zimie i w okresie śnieżnym, przy czym wiosną możliwość wystąpienia opadów śniegu w typie najbardziej sprzyjającym osiąga 20,9% (Nc), a typ NWc bardziej sprzyja występowaniu opadów śniegu (prawdopodobieństwo 17%) niż typy NEc (15,5%) i Ec (11%). We wszystkich okresach najmniej prawdopodobny opad śniegu jest podczas napływu cieplejszego powietrza z sektora południowo-zachodniego (typy: Sa, SWa i SWc) oraz podczas oddziaływania centrum układu wyżowego (Ca) (rys. 5.9). W zimie prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu w wymienionych typach osiąga 9,1% (Sa i SWc), 9,7% (SWa), 7,1% (Ca), a w przejściowych porach roku waha się około 1%.

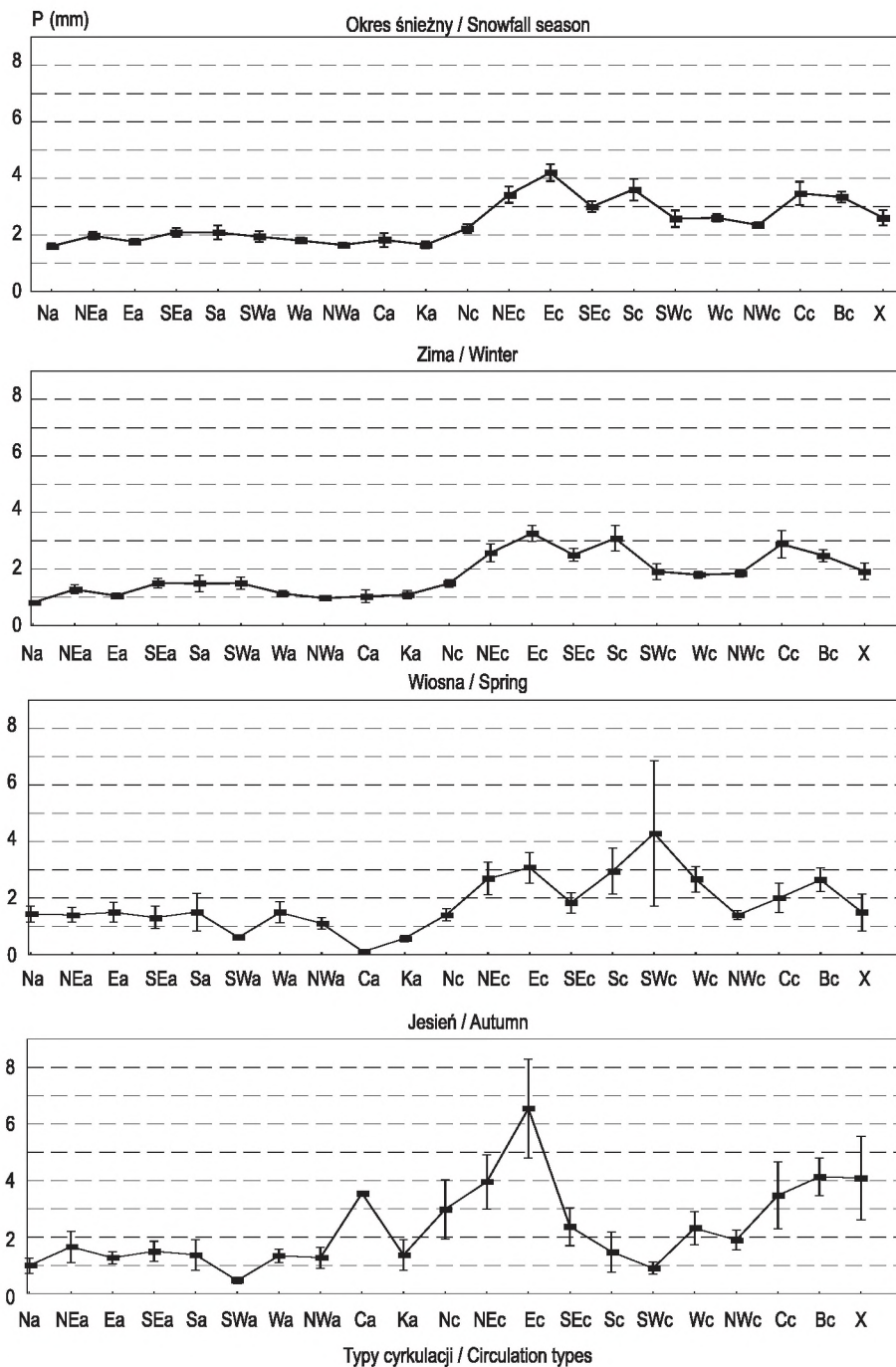
Kierunek napływu powietrza oraz rodzaj oddziałującego układu barycznego wpływają również na wysokość dobowych opadów śniegu, chociaż zależności te kształtują się nieco inaczej i są mniej wyraźne w porównaniu z prawdopodobieństwem wystąpienia opadów śniegu. Świadczy o tym mniejsze zróżnicowanie wysokości opadów dobowych w poszczególnych typach cyrkulacji (por. rys. 5.9 i 5.10). Zarówno w okresie śnieżnym, jak i w zimie najwyższe dobowe opady śniegu występują podczas napływu powietrza ze wschodu (zima – 3,3 mm, okres śnieżny – 3,6 mm) lub z południa (odpowiednio 3,1 mm i 3,0 mm) w zasięgu układu niżowego.

Stosunkowo wysokie opady są związane także z typami NEc (2,6 mm w zimie i 2,8 mm w okresie śnieżnym), SEc (odpowiednio 2,5 i 2,4 mm), Cc (odpowiednio 2,9 i 2,8 mm) i Bc (odpowiednio 2,5 i 2,7 mm). Średni opad dobowy w pozostałych typach cyklonalnych mieści się między 1,5 i 2,0 mm zarówno w zimie, jak i w okresie śnieżnym. Maksymalne dobowe opady śniegu oczywiście znacznie przewyższały wartości średnie i nie zawsze występowały w typach sprzyjających najwyższym sumom średnim (rys. 5.11). W zimie maksymalny opad dobowy śniegu o wysokości 23,7 mm pojawił się w dniu z typem NEc. Jeszcze wyższe maksimum dobowe było w okresie śnieżnym, które wystąpiło w typowym dla najwyższych opadów typie Ec



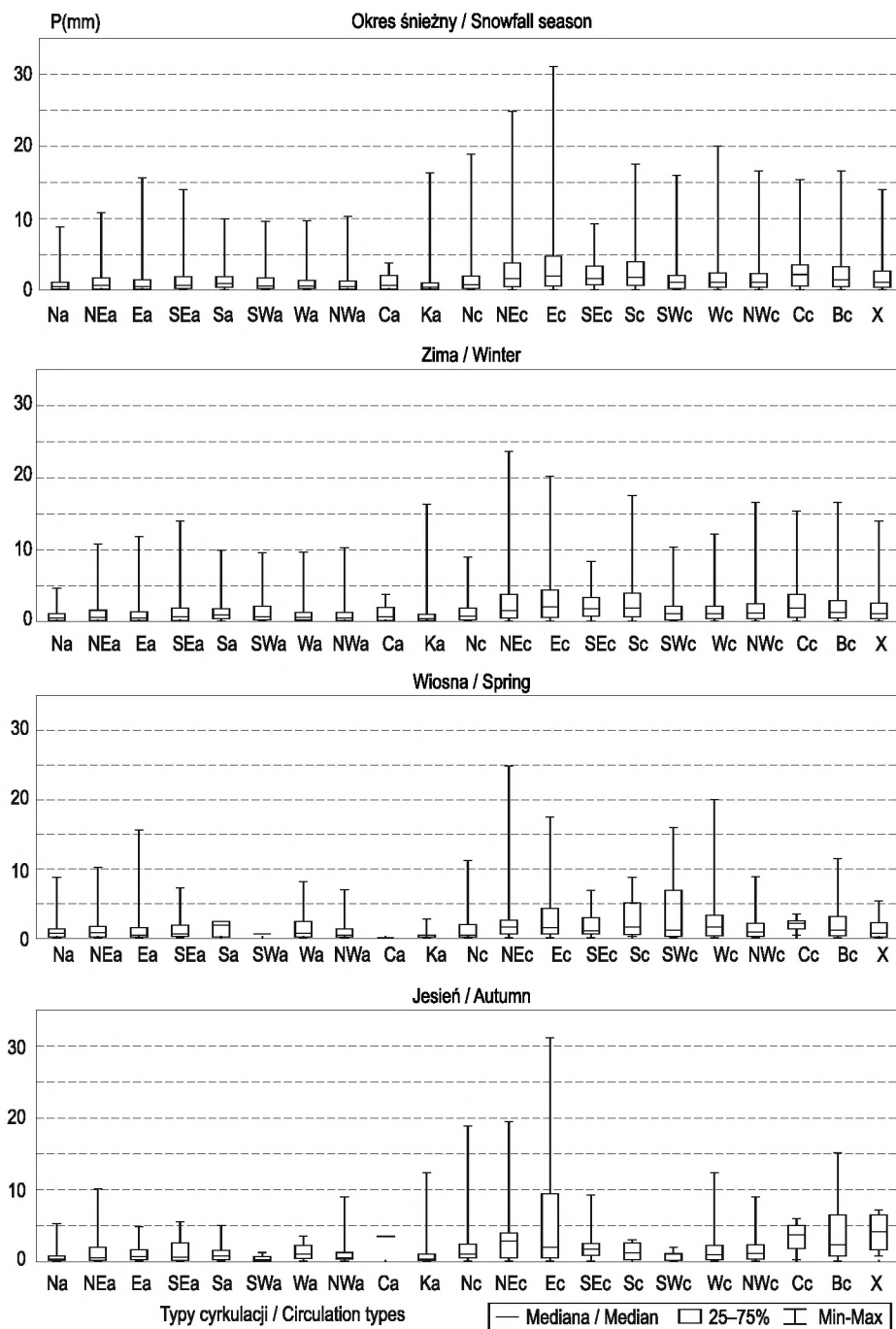
Rys. 5.9. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu śniegu (A) i prawdopodobieństwo warunkowe wszystkich opadów (B) i ich błędy standardowe w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 5.9. Conditional probability (%) of snowfall (A) and conditional probability of all precipitation (B) by circulation type and their standard errors (1874–2008)



Rys. 5.10. Średnie dobowe sumy opadów śniegu i ich błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 5.10. Average daily totals of snowfall by circulation type and their standard errors (1874–2008)



Rys. 5.11. Charakterystyki statystyczne sum dobowych opadów śniegu w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 5.11. Statistical characteristics of daily snowfall totals by circulation type (1874–2008)

(31,1 mm). Jesienią, podobnie jak zimą i w okresie śnieżnym, wysokie średnie opady dobowe związane są przede wszystkim z typem Ec (6,5 mm), który wyraźnie odznacza się pod tym względem na tle pozostałych typów cyrkulacji, przy których osiągają one maksymalnie 3,6 mm (Ca) (rys. 5.10). Wiosną najwyższy średni opad śniegu przypadł na typ SWc (4,3 mm). Maksimum odnotowane w tym typie (16,0 mm) było jednak niższe niż maksima, jakie wystąpiły podczas typów NEc (24,9 mm), Wc (20,0 mm) i Ec (17,5 mm) (rys. 5.11).

Prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śnieżnych oraz charakterystyki dotyczące ich sum w podziale na antycyklonalne i cyklonalne typy cyrkulacji zestawiono w tabeli 5.11. Ogólnie typy cyklonalne charakteryzują się zarówno większym prawdopodobieństwem wystąpienia, jak i wyższymi sumami opadów śnieżnych niż typy antycyklonalne. Prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu w zależności od rodzaju układu barycznego największe jest w zimie, a w przypadku sum opadów jesienią (tab. 5.11).

Występowanie najwyższych sum opadów śnieżnych (≥ 10 mm) wykazuje wyraźny związek z cyrkulacją atmosfery. Pomimo że występowały one przynajmniej raz we wszystkich typach cyklonalnych (z wyjątkiem SEc) oraz w niektórych typach antycyklonalnych, to zdecydowana większość wysokich opadów śniegu była związana z napływem powietrza ze wschodu w zasięgu układu niżowego (Ec – 20 przypadków) oraz w dniach z bruzdą niżową (Bc – 19 przypadków) (tab. 5.12). Prawdopodobieństwo warunkowe w odniesieniu do poszczególnych typów cyrkulacji wskazuje jednak, że wysokie opady śniegu są najbardziej prawdopodobne w typie Ec (8,5%), a następnie w typie NEc (4,6%); możliwość wystąpienia wysokich opadów śniegu w typie Bc (2,9%) jest mniejsza niż w typie Ec. Jedyń przekraczający 30 mm dobowy opad śniegu (31,1 mm) również był związany z typem Ec.

Tabela 5.11. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów śniegu oraz ich błędy standardowe w typach cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej (1874–2008)

Table 5.11. Conditional probability and daily totals of snowfall and their standard errors for cyclonic and anticyclonic circulation types (1874–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
			Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	a	c	a		c	
III–V	5,0 ± 0,3	7,6 ± 0,4	1,2 ± 0,4	15,6	2,4 ± 0,7	24,9
VI–VIII	–	–	–	–	–	–
IX–XI	2,8 ± 0,2	4,5 ± 0,3	1,5 ± 0,3	10,1	3,1 ± 0,9	31,1
XII–II	19,3 ± 0,5	29,3 ± 0,8	1,2 ± 0,2	14,0	2,3 ± 0,3	23,7
X–V	10,4 ± 0,2	14,8 ± 0,3	1,2 ± 0,1	15,6	2,4 ± 0,2	31,1

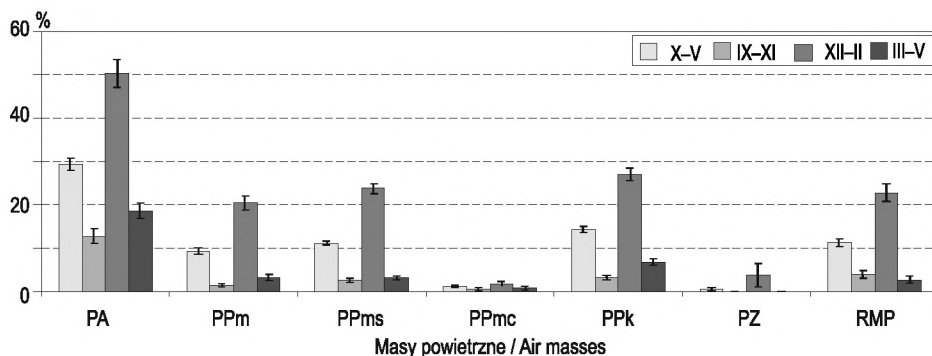
Tabela 5.12. Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia (%) dobowych sum opadów śniegu ≥ 10 mm i jego błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Table 5.12. Conditional probability (%) of daily total snowfall ≥ 10 mm and its standard error by circulation types (1874–2008)

Typ cyrkulacji Circulation type	Liczba dni Number of days	Prawdopodobieństwo Probability (%)
Na	–	–
NEa	3	$1,1 \pm 0,7$
Ea	4	$0,5 \pm 0,3$
SEa	1	$0,1 \pm 0,1$
Sa	–	–
SWa	–	–
Wa	–	–
NWa	1	$0,2 \pm 0,2$
Ca	–	–
Ka	5	$0,4 \pm 0,2$
Nc	3	$1,4 \pm 0,8$
NEc	7	$4,6 \pm 1,7$
Ec	20	$8,5 \pm 1,9$
SEc	–	–
Sc	4	$1,0 \pm 0,5$
SWc	2	$0,3 \pm 0,2$
Wc	7	$0,4 \pm 0,2$
NWc	3	$0,5 \pm 0,3$
Cc	1	$1,2 \pm 1,2$
Bc	19	$2,9 \pm 0,7$
x	1	$0,5 \pm 0,5$

5.4.2. Związek opadów śniegu z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi

Ważnym elementem cyrkulacji atmosfery kształtującym pogodę jest typ masy powietrznej napływającej nad określony obszar. We wszystkich okresach największym prawdopodobieństwem wystąpienia opadów śniegu (od 12,8% jesienią do 50,3% zimą) charakteryzują się masy arktyczne (rys. 5.12). Możliwość wystąpienia opadów śniegu w pozostałych masach powietrznych w zimie zmienia się od 20,4% przy napływie powietrza polarnego morskiego starego do 27,1% przy adwekcji mas powietrza polarnego kontynentalnego. W okresie śnieżnym zakres zmian prawdopodobieństwa osiąga niecałe 14% (od 0,5 przy PZ do 14,3% przy PPK). Należy zwrócić uwagę, że łączne prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu we wszystkich masach polarnych osiąga aż 71,3% zimą, 35,0% w okresie śnieżnym i spada do 13,4 i 7,4% odpowiednio wiosną i jesienią.

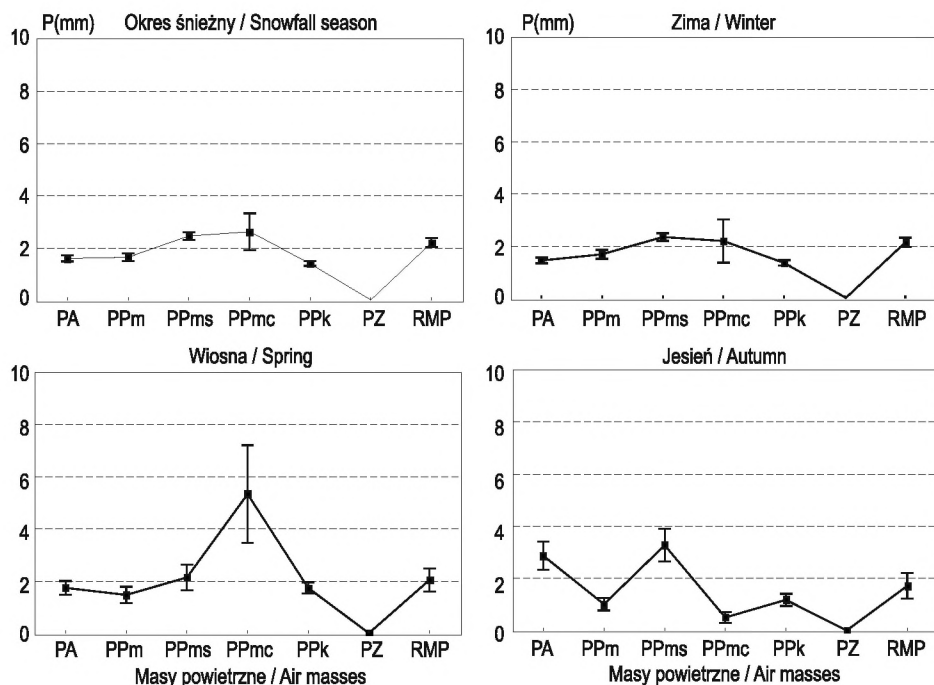


Rys. 5.12. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu śniegu i jego błąd standardowy w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 5.12. Conditional probability (%) of snowfall by air mass and its standard error (1951–2008)

W zimie i w okresie śnieżnym średnie dobowe opady śniegu, podczas występowania powietrza polarnego morskiego starego (PPms) i ciepłego (PPmc) oraz w dniach z różnymi masami powietrznymi (RMP), są nieco wyższe niż podczas napływu pozostałych typów mas (rys. 5.13). W zimie średnie sumy dobowe opadów śniegu osiągają od 2,1 (RMP) do 2,4 mm (PPms), a w okresie śnieżnym od 2,2 (RMP) do 2,6 mm (PPmc). Wiosną stosunkowo wysokie opady są podczas adwekcji PPmc (5,3 mm), przy czym ta wysoka wartość średnia charakteryzuje się znaczącym błędem standardowym wynikającym z małej liczby przypadków (tylko 3 przypadki w całym wieloleciu). Największe zróżnicowanie średniego dobowego opadu śniegu w zależności od typu masy powietrznej stwierdzono jesienią. W tej porze roku opady śniegu są najwyższe podczas adwekcji PPms (3,3 mm), wysokie są również przy napływie PA (2,9 mm). Opady śnieżne rzadko występują podczas napływu powietrza zwrotnikowego. W całym okresie badawczym odnotowano tylko 2 przypadki opadów śnieżnych w dniach z adwekcją powietrza zwrotnikowego, ale ze stosunkowo wysoką sumą dobową: 13 grudnia 1959 roku spadło 17,5 mm, a 5 stycznia 1963 roku 3,7 mm wody z opadu śnieżnego. Statystyczne charakterystyki sum opadów śnieżnych w zależności od typu masy powietrznej pokazano na rysunku 5.14. Najwyższe dobowe sumy opadów śnieżnych w Krakowie pojawiły się podczas napływu mas PPms lub PA.

W większości rozpatrywanych okresów, z wyjątkiem jesieni, występowaniu opadów śniegu najbardziej sprzyja front okluzji (rys. 5.15). Wówczas prawdopodobieństwo ich pojawienia się osiąga 31,5% w zimie, 18,7% w okresie śnieżnym i 8% wiosną. Tylko jesienią opady śniegu są bardziej prawdopodobne na froncie stacjonarnym (6,9%) niż na froncie okluzji (5,7%), przy czym różnica prawdopodobieństwa jest niewielka. We wszystkich okresach opady śnieżne pojawiają się najrzadziej podczas przejścia frontu ciepłego; w zimie pojawiają się podczas 16,5%, a w okresie śnieżnym podczas 7,2% dni z takim frontem. W przejściowych porach roku prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śniegu na froncie ciepłym jest znikome (jesień – 2,0%

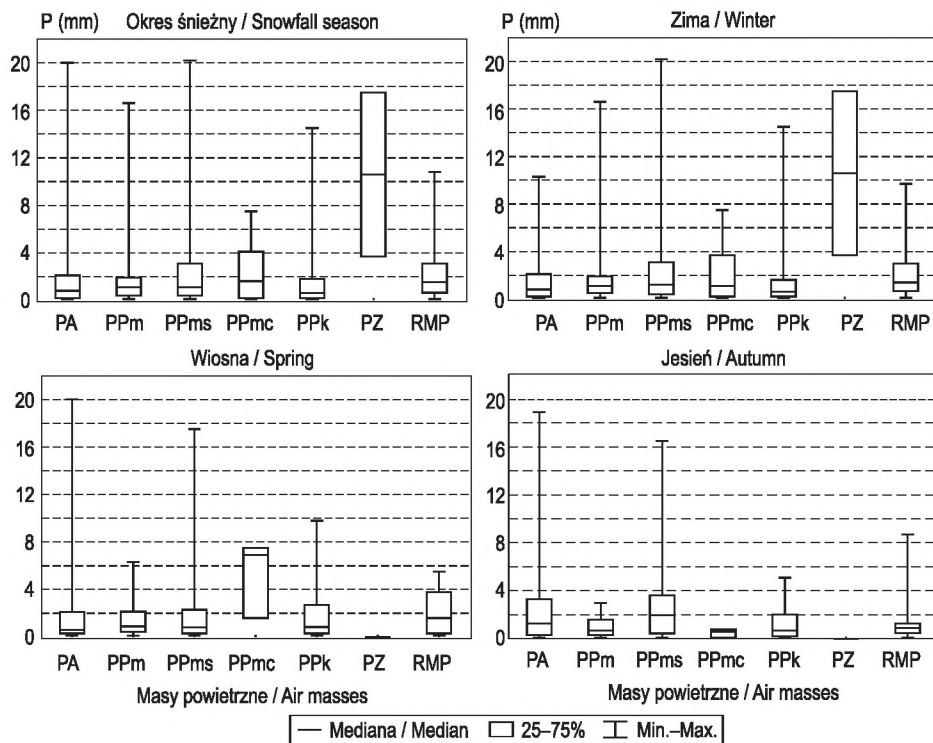


Rys. 5.13. Średnie dobowe sumy opadów śniegu i ich błąd standardowy w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 5.13. Average daily totals of snowfall by air mass and their standard errors (1951–2008)

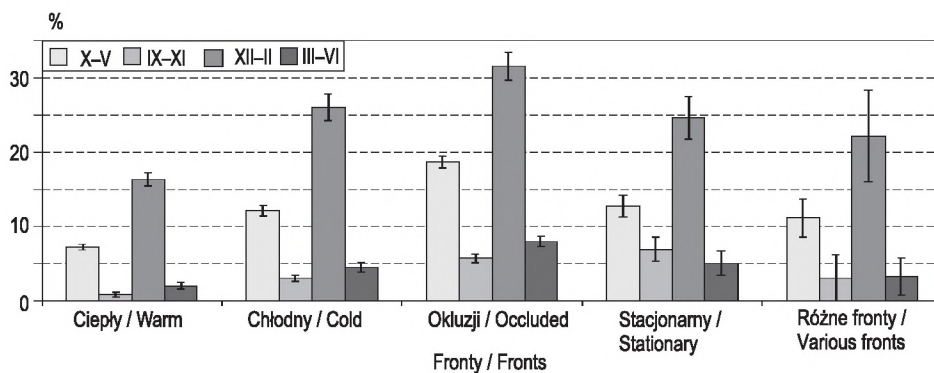
dni, wiosna – 0,2% dni). Stosunkowo często opady śnieżne są związane z jednorodną masą powietrzną (brak frontów) (tab. 5.13). W zimie prawdopodobieństwo wystąpienia opadów śnieżnych wewnątrzmasowych (24,3%) nieznacznie różni się od prawdopodobieństwa opadów związanych z przejściem różnych frontów (22,2%) lub frontu chłodnego (26,0%) oraz dorównuje prawdopodobieństwu występowania opadów na froncie stacjonarnym (24,6%).

Zależność wysokości opadów śnieżnych od rodzaju frontu atmosferycznego charakteryzuje się sezonowością. W okresie śnieżnym i w zimie najwyższe średnie dobowe sumy (3,5 mm) są związane z frontem ciepłym (rys. 5.16). Niewiele mniejsze sumy są także w dniach z przejściem różnych frontów (2,9 mm) lub z frontem stacjonarnym (okres śnieżny – 2,4 mm, zima – 3,0 mm). Najniższe opady przynosi z sobą front chłodny. Stosunkowo niskie są też opady w dniach bez frontów (około 1,5 mm) (tab. 5.13). Front okluzji, który najbardziej sprzyja występowaniu opadów śniegu, zimą przynosi średnio 2,1 mm, a w okresie śnieżnym 2,4 mm wody opadowej ze śniegu na dobę. Okluzja przynosi natomiast najwyższe opady śniegu jesienią (3,6 mm), a wiosną najniższe (1,3 mm). Wiosną front ciepły przynosi wyraźnie wyższe opady średnie (4,5 mm) niż pozostałe rodzaje frontów (co najwyżej 2,3 mm)



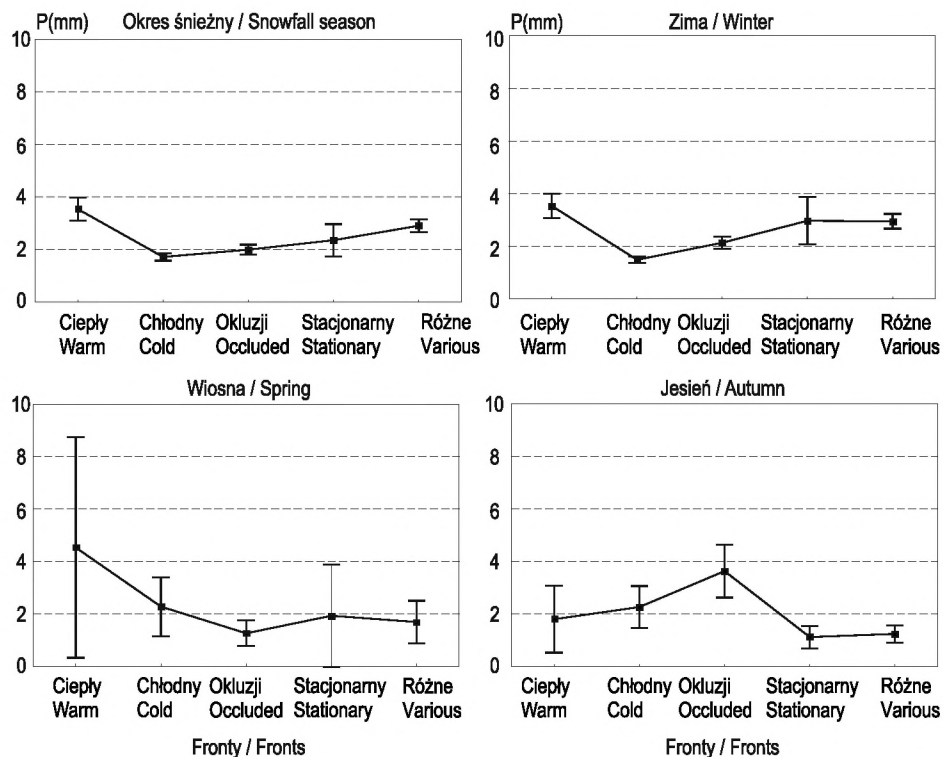
Rys. 5.14. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów śniegu w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 5.14. Statistical characteristics of daily snowfall totals by air mass (1951–2008)



Rys. 5.15. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadów śniegu i jego błąd standardowy na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 5.15. Conditional probability (%) of snowfall by type of front and its standard error (1951–2008)



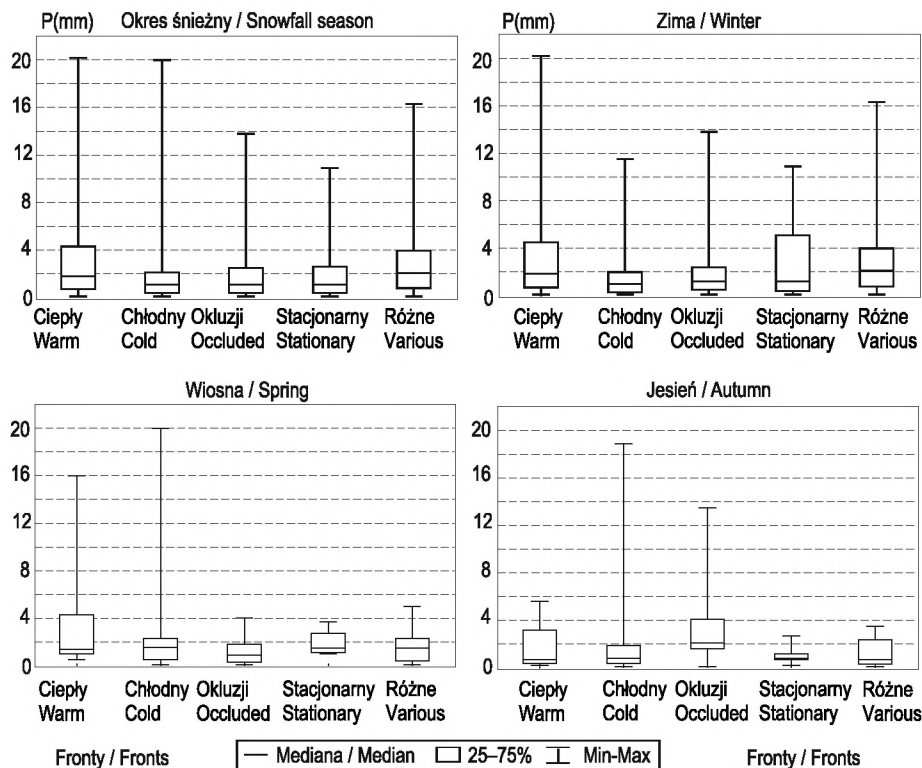
Rys. 5.16. Średnie dobowe sumy opadów śniegu i ich błąd standardowy na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 5.16. Average daily totals of snowfall by type of front and their standard errors (1951–2008)

Tabela 5.13. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów śniegu wewnątrzmasowych i frontowych oraz ich błędy standardowe (1951–2008)

Table 5.13. Conditional probability of snowfall and daily total air mass and frontal snowfall and their standard errors (1951–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobową / Daily totals (mm)			
	Opady / Precipitation		Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	wewnątrzmasowe air-mass	frontowe frontal	wewnątrzmasowe air-mass		frontowe frontal	
III–V	6,3 ± 0,5	4,2 ± 0,4	1,7 ± 0,2	17,5	2,3 ± 0,7	20,0
VI–VIII	–	–	–	–	–	–
IX–XI	3,5 ± 0,3	3,0 ± 0,8	2,4 ± 0,3	18,5	2,0 ± 0,8	18,9
XII–II	24,3 ± 0,9	23,8 ± 1,0	1,5 ± 0,1	14,0	2,6 ± 0,4	20,2
X–V	12,6 ± 0,4	11,8 ± 0,5	1,6 ± 0,1	18,9	2,5 ± 0,3	20,2



Rys. 5.17. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów śniegu na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 5.17. Statistical characteristics of daily snowfall totals by type of front (1951–2008)

(rys. 5.16). Warto również zwrócić uwagę na duży rozrzut sum dobowych opadów śniegu związanych z frontem chłodnym (z wyjątkiem zimy), który wyznaczony jest przez ich wartości ekstremalne (rys. 5.17). Uwagę zwraca również stosunkowo małe zróżnicowanie sum dobowych wiosną podczas frontu okluzji, stacjonarnego i różnych frontów.

5.4.3. Związek opadów śniegu ze wskaźnikami cyrkulacji

Występowanie opadów śniegu w Krakowie wykazuje najsilniejszy związek z Oscylacją Północnoatlantycką (wskaźnik NAO) (tab. 5.14). Zależności korelacyjne między liczbą dni z opadem śniegu i wartością wskaźnika NAO są statystycznie istotne niemal we wszystkich rozpatrywanych sezonach i miesiącach. Wzmocnienie przepływu zachodniego, wyrażające się wzrostem wartości wskaźnika NAO, powoduje spadek częstości występowania opadów śniegu. Zależności między tymi zmiennymi

Tabela. 5.14. Współczynniki korelacji (r) między liczbą dni z opadem śniegu a wskaźnikami cyrkulacji: R^2 – współczynnik determinacji, α – istotność współczynnika r (1874–2008)

Table 5.14. Correlation coefficients (r) between the number of days with snowfall and circulation indices: R^2 – coefficient of determination, α – statistical significance of r coefficient (1874–2008)

Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2
I	−0,499	***	0,249	−0,521	***	0,271	−0,117	–	0,014	+0,192	*	0,037
II	−0,461	***	0,212	−0,314	***	0,098	−0,421	***	0,177	+0,201	*	0,040
III	−0,384	***	0,147	−0,112	–	0,013	−0,363	***	0,132	+0,183	*	0,034
IV	−0,112	–	0,012	−0,106	–	0,011	−0,203	**	0,041	+0,047	–	0,002
V	−0,165	–	0,027	−0,096	–	0,009	−0,051	–	0,003	−0,046	–	0,002
...	–	–		–	–		–	–		–	–	
X	−0,219	**	0,048	−0,116	–	0,014	−0,155	–	0,024	−0,069	–	0,005
XI	−0,042	***	0,002	−0,167	–	0,028	−0,344	***	0,119	+0,046	–	0,002
XII	−0,374	***	0,140	0,022	–	0,000	−0,194	*	0,038	+0,112	–	0,013
X–V	−0,439	***	0,193	−0,145	–	0,021	−0,122	–	0,015	+0,040	–	0,002
VII–VI	−0,334	***	0,112	−0,236	**	0,055	−0,119	–	0,014	+0,002	–	0,000
III–V	−0,277	**	0,077	−0,050	–	0,002	−0,253	**	0,064	+0,096	–	0,009
VI–VIII	–	–		–	–	–	–	–		–	–	
IX–XI	−0,351	***	0,123	−0,175	*	0,030	−0,293	**	0,086	−0,098	–	0,010
XII–II	−0,525	***	0,276	−0,140	–	0,020	−0,174	*	0,030	+0,128	–	0,016

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Tabela. 5.15. Współczynniki korelacji (r) między sumami opadów śniegu a wskaźnikami cyrkulacji: R^2 – współczynnik determinacji, α – istotność współczynnika r (1874–2008)

Table 5.15. Correlation coefficients (r) between total snowfall and circulation indices: R^2 – coefficient of determination, α – statistical significance of r coefficient (1874–2008)

Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2
I	-0,430	***	0,184	-0,447	***	0,200	+0,001	—	0,000	+0,343	***	0,118
II	-0,462	***	0,213	-0,336	***	0,113	-0,265	**	0,070	+0,290	**	0,084
III	-0,225	**	0,051	-0,001	—	0,000	-0,289	**	0,083	+0,166	—	0,028
IV	-0,013	—	0,000	-0,129	—	0,017	-0,172	*	0,029	+0,089	—	0,008
V	-0,077	—	0,006	-0,094	—	0,009	-0,014	—	0,000	-0,027	—	0,001
...												
X	-0,252	**	0,064	-0,099	—	0,010	-0,113	—	0,013	-0,030	—	0,001
XI	-0,330	***	0,109	-0,106	—	0,011	-0,233	***	0,054	+0,070	—	0,005
XII	-0,301	***	0,091	-0,095	—	0,009	-0,060	—	0,004	+0,271	**	0,074
X–V	-0,346	***	0,120	-0,171	*	0,029	-0,006	—	0,000	+0,150	—	0,022
VII–VI	-0,274	**	0,075	-0,153	—	0,023	+0,000	—	0,000	+0,061	—	0,004
III–V	-0,112	—	0,012	+0,073	—	0,005	-0,240	**	0,058	+0,063	—	0,004
VI–VIII												
IX–XI	-0,312	***	0,097	-0,064	—	0,004	-0,263	**	0,069	-0,017	—	0,000
XII–II	-0,503	***	0,253	-0,125	—	0,016	-0,044	—	0,002	+0,325	***	0,105

¹ $\alpha > 0,05$ – —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

są najsilniejsze w styczniu i w lutym, kiedy to wskaźnik NAO wyjaśnia odpowiednio 24,9 i 21,2% wariancji liczby dni z opadem śniegu; w marcu i grudniu współczynniki determinacji spadają do około 14,0%. Współczynnik korelacji między NAO i liczbą dni z opadem śniegu w zimie jest wyższy niż w którymkolwiek miesiącu – w zimie wskaźnik NAO wyjaśnia 27,6% wariancji liczby dni z opadem śniegu.

Spośród regionalnych wskaźników cyrkulacji na uwagę zasługuje wskaźnik cyrkulacji południkowej. Intensyfikacja napływu powietrza z południa, wyrażająca się wzrostem wartości wskaźnika S, oznacza spadek liczby dni z opadem śniegu. Świadczą o tym ujemne współczynniki korelacji, statystycznie istotne we wszystkich sezonach oraz w miesiącach zimowych (z wyjątkiem stycznia) i wiosennych. Wpływ cyrkulacji południkowej na występowanie opadów śniegu jest najsilniejszy na przełomie zimy i wiosny oraz zimy i jesieni. W lutym, marcu i listopadzie wyjaśnia on odpowiednio 17,7, 13,2 oraz 11,9% wariancji liczby dni z opadem śnieżnym. W porach roku współczynniki determinacji są niższe, a istotność statystyczna związków korelacyjnych słabsza (tab. 5.14).

Częstość występowania opadów śniegu wykazuje znacznie słabszy związek korelacyjny ze wskaźnikiem cyrkulacji zachodniej i wskaźnikiem cykloniczności. Wartość wskaźnika W istotnie wpływa na liczbę dni z opadem śnieżnym w styczniu i lutym, a spośród sezonów jedynie jesienią. W styczniu wyjaśnia 27,1% wariancji liczby dni z opadem śnieżnym, ale w lutym i jesienią już tylko 9,8 i 3,0% wariancji. Jesienią zależności są niemal na granicy istotności statystycznej. Liczba dni z opadem śniegu przejawia istotną zależność korelacyjną od wskaźnika cykloniczności w pierwszych 3 miesiącach roku, przy czym wyjaśnia on nie więcej niż 4,0% wariancji tej liczby dni z opadem śnieżnym (tab. 5.14).

Zależności statystyczne wysokości opadów śniegu od rozpatrywanych wskaźników cyrkulacji generalnie kształtują się podobnie (tab. 5.15). Wzrost nasilenia NAO powoduje istotny spadek sum opadów śnieżnych od października do marca, a w przypadku pór roku – zimą i jesienią. Wartość wskaźnika NAO wyjaśnia największą część wariancji sum opadowych zimą (współczynnik determinacji 25,3%), a następnie w lutym (współczynnik determinacji 21,3%). Cyrkulacja strefowa W istotnie kształtuje sumy opadów śniegu tylko w styczniu i lutym oraz okresie śnieżnym. W styczniu wyjaśnia około 2 razy więcej (20,0%) wariancji opadów śnieżnych niż w lutym (11,3%). Zmiany wysokości opadów śniegu są istotnie skorelowane z cyrkulacją południkową w lutym, marcu, kwietniu i listopadzie oraz wiosną i jesienią (tab. 5.15). Współczynnik determinacji określający wielkość wariancji sum opadowych, jaka jest wyjaśniona przez zmienność wskaźnika S, osiąga maksymalnie tylko 8,3%. Wskaźnik cykloniczności determinuje wielkość zarówno sezonowych, jak i miesięcznych opadów śniegu tylko zimą (tab. 5.15).

6. OPADY MIESZANE

Do opadów mieszanych, oznaczonych kodem 2, zaliczono dni, w których wystąpiły opady śniegu z deszczem lub opady śniegu i deszczu w różnych porach dnia. Okres występowania opadów mieszanych w Krakowie pokrywa się z okresem występowania opadów śnieżnych. Z tego względu charakterystyki opadów mieszanych przedstawiono w tych samych okresach co charakterystyki opadów śnieżnych, włączając okres od października do maja, który określono terminem „okres śnieżny”.

6.1. Występowanie i sumy opadów mieszanych

Opady mieszane w Krakowie występują niemal przez cały rok, z wyjątkiem lipca i sierpnia, przy czym ogólnie prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest niewielkie – tylko w grudniu nieznacznie przekracza 10%, a w pozostałych miesiącach zimowych i w marcu osiąga ponad 9%. Opady mieszane sporadycznie występują również we wrześniu i w czerwcu (tab. 6.1). W ciągu całego rozpatrywanego wielolecia w czerwcu wystąpiły one dwukrotnie, we wrześniu 8 razy. Maksymalną miesięczną liczbę dni z opadem mieszanym stwierdzono w grudniu 2005 roku (11 dni), przy czym w pozostałych miesiącach zimowych oraz w marcu największa częstość opadów mieszanych jest podobna (tab. 6.1). Prawdopodobieństwo warunkowe opadów mieszanych największe jest w marcu (ponad 20%), a w grudniu, styczniu i lutym osiąga średnio 19%.

Możliwość pojawienia się opadów mieszanych w porach roku zmienia się od 3,4% jesienią do 9,7% w zimie, a prawdopodobieństwo warunkowe ich wystąpienia osiąga odpowiednio 7,2 i 19,2%. W roku (liczonym od lipca do czerwca) stwierdza się maksymalnie 35 dni z opadem mieszanym.

Sumy opadów mieszanych w większości miesięcy nie przekraczają 10 mm (z wyjątkiem marca – 11,5 mm i grudnia – 10,3 mm). Różnice między średnimi opadami w sąsiednich miesiącach są statystycznie istotne ($\alpha = 0,05$) w lutym, marcu i kwietniu oraz we wrześniu, październiku i listopadzie. Maksymalne sumy miesięczne znacznie przewyższają wartości średnie (tab. 6.2). Absolutnie największą wysokość opadów mieszanych (96,0 mm) odnotowano w Krakowie w kwietniu 1916 roku. Opady mieszane przekraczały 50 mm w marcu 1906 i w grudniu 2005 roku. Istotnie różne są także średnie sumy sezonowe osiągające najwyższą wartość zimą (ponad 28 mm), a najniższą na wiosnę (ponad 20 mm). Średnio w roku (liczonym od lipca do czerwca) spada około 63 mm opadów mieszanych. W całym rozpatrywanym wieloleciu

Tabela. 6.1. Liczba dni i prawdopodobieństwo wystąpienia opadów mieszanych oraz ich błędy standardowe (1863–2008)

Table. 6.1. Number of days with mixed precipitation and probability of mixed precipitation and their standard errors (1863–2008)

Okres Period	Dni z opadem Days with precipitation		Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) Probability of occurrence (%)	
	Śr. / Av.	Max.	Wystąpienia ¹ Occurrence ¹	Warunkowe ² Conditional ²
I	2,9 ± 0,2	10	9,3 ± 0,5	18,7 ± 1,0
II	2,7 ± 0,2	9	9,6 ± 0,6	19,1 ± 1,1
III	3,0 ± 0,2	9	9,5 ± 0,5	20,2 ± 1,0
IV	1,7 ± 0,1	8	5,8 ± 0,5	12,1 ± 0,9
V	0,3 ± 0,1	4	1,0 ± 0,2	2,0 ± 0,4
VI	0,02 ± 0,01	1	0,05 ± 0,03	0,1 ± 0,1
VII	–	–	–	–
VIII	–	–	–	–
IX	0,10 ± 0,02	1	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,1
X	0,7 ± 0,1	5	2,1 ± 0,3	4,3 ± 0,6
XI	2,3 ± 0,2	9	7,8 ± 0,5	14,9 ± 1,0
XII	3,1 ± 0,2	11	10,1 ± 0,6	19,1 ± 0,9
III–V	5,0 ± 0,2	18	5,4 ± 0,3	11,5 ± 0,5
VI–VIII	0,02 ± 0,01	1	0,01 ± 0,01	0,04 ± 0,02
IX–XI	3,1 ± 0,2	9	3,4 ± 0,2	7,2 ± 0,4
XII–II	8,7 ± 0,3	19	9,7 ± 0,4	19,2 ± 0,6
X–V	16,7 ± 0,4	35	6,0 ± 0,2	14,2 ± 0,3
VII–VI	16,8 ± 0,4	35	4,2 ± 0,1	9,7 ± 0,2

¹ liczone w stosunku do liczby dni w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days

² liczone w stosunku do liczby dni z opadem w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days with precipitation

było 199 dni z opadem mieszanym ≥ 10 mm; średnia roczna liczba takich dni wynosi tylko 1,5 dnia. Najwięcej, bo 49 dni z opadem mieszanym ≥ 10 mm przypadło na marzec, a spośród pór roku na wiosnę – 79 dni. Prawdopodobieństwo wystąpienia wysokich opadów mieszanych w przebiegu rocznym tylko w marcu przekracza 1% (rys. 6.1).

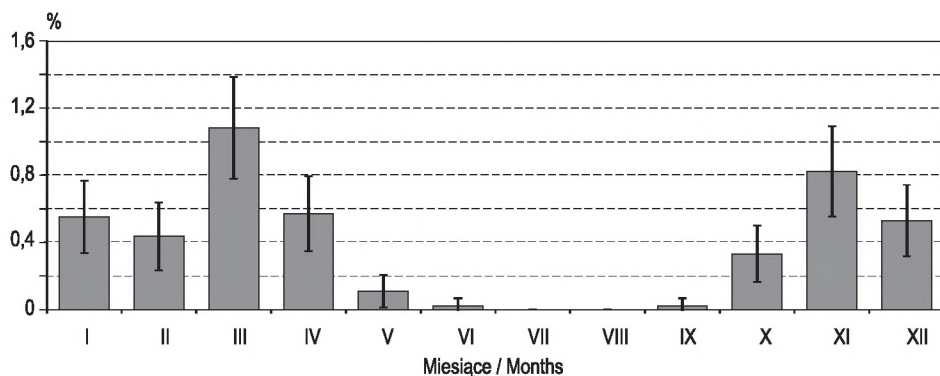
Rozpatrzono miesięczne sumy opadów mieszanych o różnym prawdopodobieństwie przewyższenia (rys. 6.2). Wysokość opadów mieszanych odpowiadająca 90% prawdopodobieństwu przewyższenia jest większa od 0 mm tylko w grudniu.

Sumy opadów bardzo wysokich, pojawiających się w Krakowie raz na 100 lat ($p = 1\%$), zmieniają się od 3,4 mm w czerwcu do ponad 40 mm w kwietniu, natomiast w listopadzie, grudniu i marcu przekraczają 40 mm (rys. 6.2).

Tabela. 6.2. Sumy opadów mieszanych, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności, γ_1 – skośność (błąd standardowy skośności wynosi 0,2) (1863–2008)

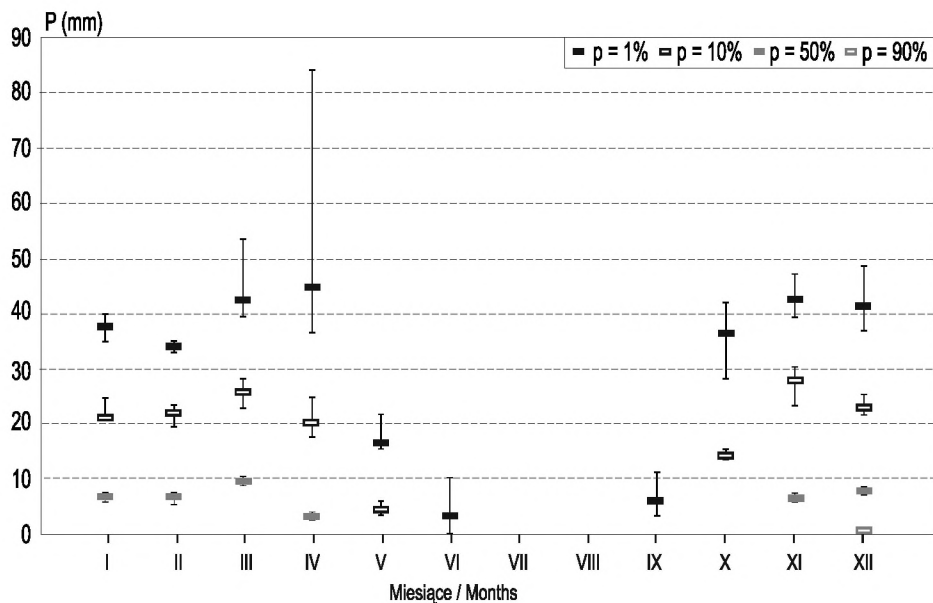
Table 6.2. Total mixed precipitation, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard deviation, V – variability coefficient, γ_1 – skewness (the standard error of skewness is 0.2) (1863–2008)

Okres Period	Suma / Total (mm)			σ (mm)	V (%)	γ_1
	Śr. / Av.	Min.	Max.			
I	9,7 ± 0,8	0,0	40,1	9,5	98	1,2
II	8,9 ± 0,7	0,0	35,2	8,4	95	1,1
III	11,5 ± 0,9	0,0	56,7	10,5	91	1,3
IV	7,6 ± 1,0	0,0	96,0	11,9	155	3,7
V	1,3 ± 0,3	0,0	23,5	3,7	281	3,6
VI	0,1 ± 0,1	0,0	11,7	1,1	887	9,6
VII	–	–	–	–	–	–
VIII	–	–	–	–	–	–
IX	0,2 ± 0,1	0,0	12,5	1,3	586	7,8
X	3,5 ± 0,6	0,0	42,3	7,5	213	2,9
XI	10,0 ± 0,9	0,0	47,9	11,1	110	1,4
XII	10,3 ± 0,8	0,0	50,1	9,9	96	1,4
III–V	20,5 ± 1,3	0,0	96,1	15,9	77	1,2
VI–VIII	–	–	–	–	–	–
IX–XI	13,8 ± 1,0	0,0	47,9	12,0	87	1,0
XII–II	28,8 ± 1,4	0,0	81,1	16,8	58	0,6
X–V	62,7 ± 2,2	10,6	159,7	26,1	42	0,4
VII–VI	63,3 ± 2,1	10,6	159,7	25,8	41	0,4



Rys. 6.1. Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) dnia z opadem mieszanym ≥ 10 mm i jego błąd standardowy (1863–2008)

Fig. 6.1. Probability (%) of days with mixed precipitation ≥ 10 mm and its standard error (1863–2008)



Rys. 6.2. Przebieg roczny kwantyli sum opadów mieszanych i ich błąd standardowy (1863–2008)

Fig. 6.2. Annual distribution of mixed precipitation quantiles and their standard errors (1863–2008)

W przebiegu rocznym opady mieszane stanowią największą część sumy ogólnej w marcu (ponad 30%), a w miesiącach zimowych i w listopadzie ich udział przekracza 20%. W skrajnych przypadkach, opisanych wartościami maksymalnymi, opady mieszane mogą stanowić od ponad 77% (marzec i grudzień) do ponad 85% (listopad) miesięcznej sumy w okresie ich częstego występowania, tj. od listopada do marca (tab. 6.3). Średni udział opadów mieszanych w sumach sezonowych zmienia się od ponad 28% w zimie do ponad 9% jesienią, maksymalny zaś od 1,9% latem (za sprawą wspomnianych już sporadycznych opadów mieszanych w czerwcu) do ponad 68% w grudniu. Opady mieszane średnio stanowią tylko 9,5% sumy rocznej, przy czym udział ten w poszczególnych latach zmieniał się od 2% w 1874/75 do niecałych 21% w 1916/17.

6.2. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów mieszanych

Częstość występowania opadów mieszanych zależy od temperatury powietrza, co zostanie potwierdzone w dalszej części niniejszego rozdziału. Obserwowane obecnie tendencje wzrostowe temperatury powietrza zapewne mają istotny udział w kształtowaniu zmian charakterystyk opadów mieszanych. W związku z tym również te opady, obok opadów śnieżnych, można traktować jako ważny wskaźnik zmian kli-

Tabela 6.3. Udział (%) opadów mieszanych w ogólnej sumie opadów oraz jego błąd standardowy (1863–2008)

Table 6.3. Contribution (%) of mixed precipitation to overall total precipitation and its standard error (1863–2008)

Okres Period	Śr./ Av. (%)	Min.	Max.
I	27,3 ± 1,7	0,0	80,5
II	28,5 ± 1,8	0,0	84,8
III	30,8 ± 1,8	0,0	77,8
IV	15,4 ± 1,6	0,0	76,5
V	2,0 ± 0,5	0,0	34,1
VI	0,1 ± 0,1	0,0	4,1
VII	–	–	–
VIII	–	–	–
IX	0,4 ± 0,2	0,0	15,6
X	6,3 ± 1,0	0,0	62,4
XI	22,6 ± 1,7	0,0	85,5
XII	26,7 ± 1,6	0,0	77,6
III–V	13,6 ± 0,8	0,0	48,7
VI–VIII	0,05 ± 0,04	0,0	1,9
IX–XI	9,3 ± 0,7	0,0	31,9
XII–II	28,5 ± 1,1	0,0	68,6
X–V	18,5 ± 0,6	3,6	39,0
VII–VI	9,5 ± 0,3	2,0	20,7

matu, przy czym nie mają one wpływu na kształtowanie (modyfikację) warunków klimatycznych, nie prowadzą bowiem do uformowania się pokrywy śnieżnej.

W rozpatrywanym wieloleciu zaobserwowano statystycznie istotny wzrost liczby dni z opadem mieszanym w porze zimowej oraz w każdym z miesięcy zimowych, jak również w całym roku. W zimie wielkość trendu osiągnęła około 4,5 dnia na 100 lat, a trend liniowy wyjaśnia nieco ponad 24% wariancji liczby dni z opadem mieszanym (tab. 6.4).

Tendencję wzrostową liczby dni z opadem mieszanym w zimie potwierdzają jej wartości wygładzone filtrem Gaussa (rys. 6.3).

Wzrost częstości opadów mieszanych wynosi około 1,2 dnia na 100 lat w lutym oraz około 1,5 dnia na 100 lat w styczniu i grudniu, przy czym procent wyjaśnionej wariancji w tym przypadku jest stosunkowo niski (10,2% w styczniu, 6,8% w lutym).

Zmiany liczby dni z opadem mieszanym są zauważalne także w okresie śnieżnym. Wielkość trendu liniowego (4,3 dnia/100 lat) jest niemal taka sama jak w zimie, ale współczynnik determinacji jest o połowę niższy (tab. 6.4). Charakter zmian lic-

Tabela. 6.4. Współczynniki trendu liczby dni z opadem mieszanym opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 6.4. Coefficient of trend of the number of days with mixed precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

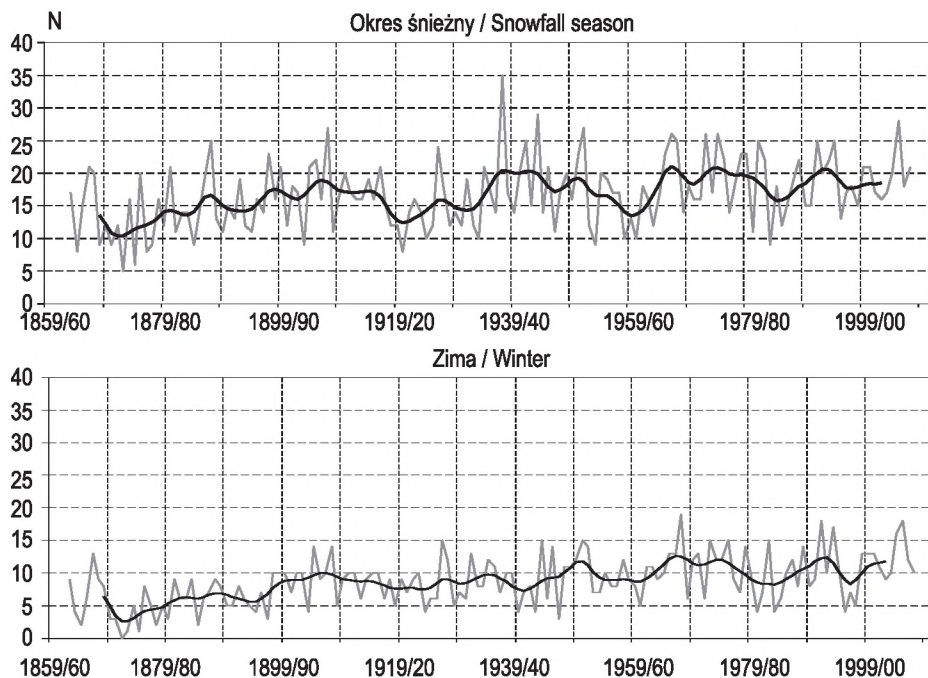
Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/100 lat) Regression coefficient (days/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,102	$+1,5 \pm 0,4$	0,0001	***
II	0,068	$+1,2 \pm 0,4$	0,0015	**
III	0,005	$+0,3 \pm 0,4$	0,40	—
IV	0,000	$+0,0 \pm 0,3$	0,95	—
...	—	—	—	—
XI	0,010	$+0,4 \pm 0,4$	0,22	—
XII	0,090	$+1,5 \pm 0,4$	0,0002	***
III–V	0,001	$-0,2 \pm 0,6$	0,72	—
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,000	$-0,1 \pm 0,4$	0,87	—
XII–II	0,242	$+4,5 \pm 0,7$	0,0000	***
X–V	0,118	$+4,3 \pm 1,0$	0,0000	***
VII–VI	0,114	$+4,2 \pm 1,0$	0,0000	***

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

by dni z opadem mieszanym w zimie i w okresie śnieżnym dobrze odzwierciedlają wykresy kumulowanych odchyleń od średniej (rys. 6.4). Wskazują one na przewagę ujemnych odchyleń liczby dni z opadem mieszanym w okresie od początku wielolecia do przełomu lat 20. i 30. XX wieku oraz przewagę dodatnich odchyleń od średniej w okresie późniejszym. W przejściowych porach roku nie stwierdzono istotnych zmian liczby dni z opadem mieszanym. Niemniej jednak warto zwrócić uwagę na ujemny kierunek współczynników trendu liniowego w tych sezonach (tab. 6.4).

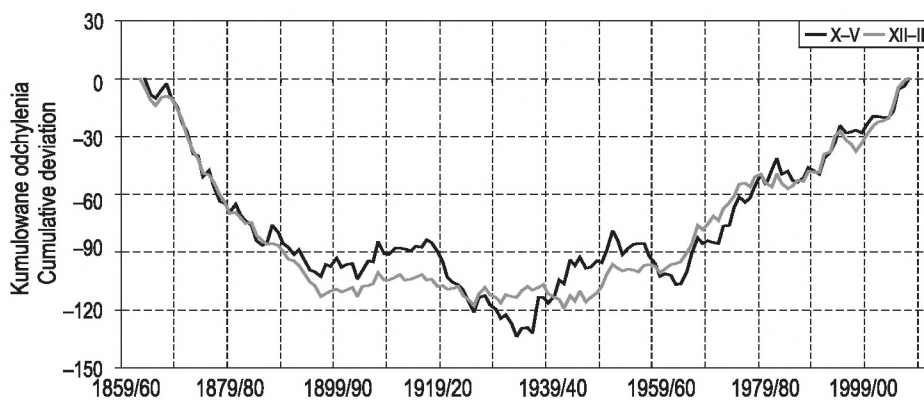
Zmiany wysokości opadów mieszanych ogólnie nawiązują do zmian częstości ich występowania, z wyjątkiem lutego (por. tab. 6.4 i 6.5). Statystycznie istotny wzrost sum opadów mieszanych obserwuje się w grudniu i styczniu, przy czym w styczniu trend liniowy jest bardziej istotny ($p = 0,0001$) i wyjaśnia większą część ich wariancji (10,3%) niż w grudniu ($p = 0,0177$; $R^2 = 3,8\%$). Istotny wzrost sum opadów mieszanych zachodzi także w porze zimowej i w okresie śnieżnym; wielkość trendów osiąga odpowiednio 13,5 i 10,6 mm na 100 lat, z tym że istotność statystyczna tendencji w okresie śnieżnym jest słaba (tab. 6.5).

W zimie wyraźny wzrost sum opadów mieszanych zachodził przede wszystkim w okresie od początku badanego wielolecia do połowy lat 60. XX wieku, ze stosunkowo wysokimi opadami w pierwszych 2 dekadach tego wieku (rys. 6.5). W ostatnich dekadach badanego wielolecia (od początku lat 80. XX wieku) zauwa-



Rys. 6.3. Przebieg liczby dni z opadem mieszanym (N) w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 6.3. Variation of the number of days with mixed precipitation (N) in snowfall season (Oct–May) and per winter; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)



Rys. 6.4. Kumulowane odchylenia liczby dni z opadem mieszanym w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 6.4. Cumulative deviations of the number of days with mixed precipitation in snowfall season (Oct–May) and in winter from the multiannual average (1863–2008)

Tabela. 6.5. Współczynniki trendu sum opadów mieszanych opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 6.5. Coefficient of trend of the total of mixed precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

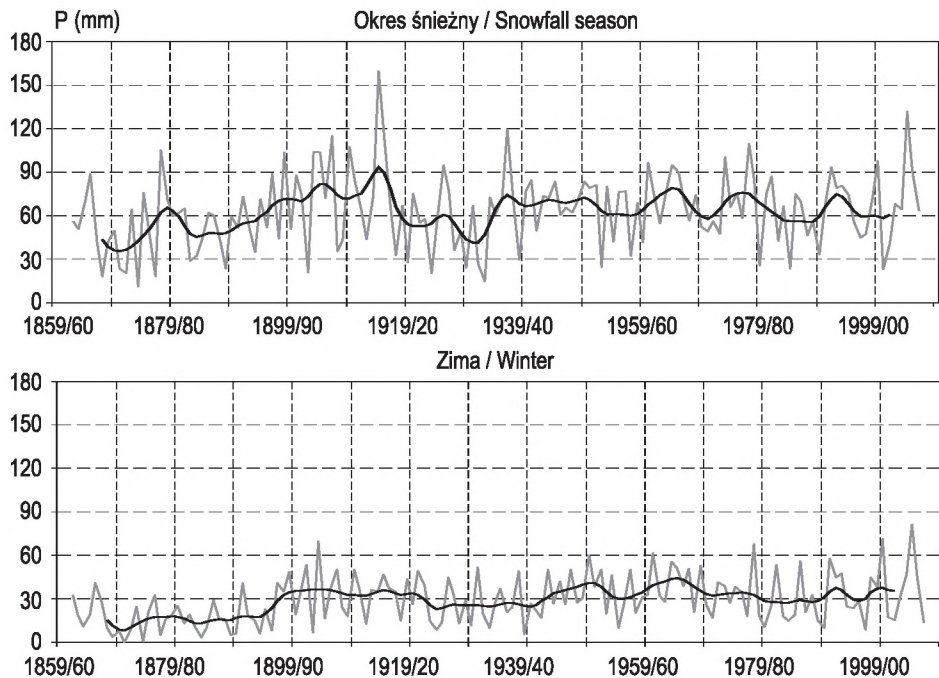
Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/100 lat) Regression coefficient (mm/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,103	+7,2 ± 1,8	0,0001	***
II	0,008	+1,8 ± 1,7	0,29	—
III	0,000	+0,1 ± 2,1	0,97	—
IV	0,001	+1,0 ± 2,3	0,67	—
...	—	—	—	—
XI	0,000	−0,1 ± 2,2	0,96	—
XII	0,038	+4,5 ± 1,9	0,017	*
III–V	0,001	−1,3 ± 3,1	0,69	—
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,007	−2,3 ± 2,4	0,32	—
XII–II	0,117	+13,5 ± 3,1	0,0000	***
X–V	0,030	+10,6 ± 5,1	0,038	*
VII–VI	0,027	+10,1 ± 5,1	0,048	*

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

za się większą niż w okresie wcześniejszym zmienność sum opadów mieszanych. Dwie najwyższe sumy zimowych opadów mieszanych przypadły na sezony 2005/06 (81,1 mm) i 2000/01 (71,3 mm), ale w sezonie 2007/08 ich suma osiągnęła tylko 13,8 mm, a w 2001/02 17,5 mm.

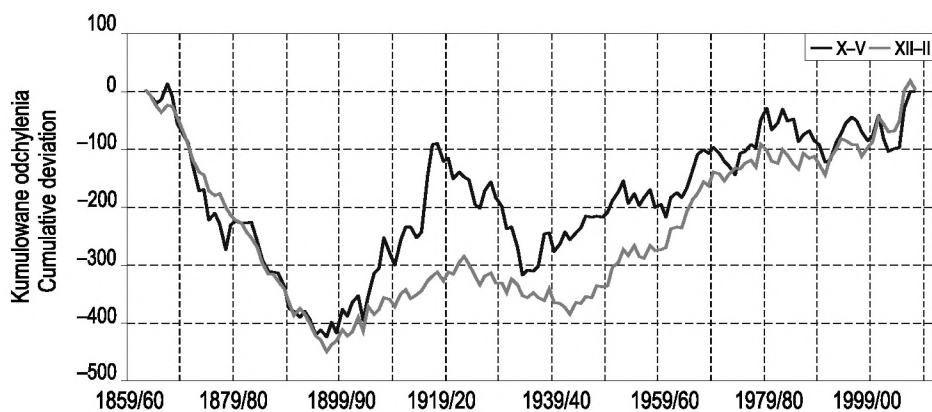
W okresie śnieżnym wysokość opadów mieszanych wzrastała od początku okresu obserwacji do połowy drugiej dekady XX wieku (sezon 1915/16), kiedy to wystąpił najwyższy w rozpatrywanym wieloleciu opad mieszany 159,7 mm. W pozostałych latach sumy opadów mieszanych wahały się około wartości średniej (rys. 6.5). Pomiędzy braku wyraźnych tendencji zmian sum opadów mieszanych w okresie śnieżnym od połowy drugiej dekady XX wieku w przebiegu wieloletnim raczej przeważały dodatnie odchylenia od średniej (rys. 6.6). Wzrost sum opadów mieszanych w zimie oraz w okresie śnieżnym zachodził od początku wielolecia do połowy lat 90. XIX wieku, sumy te jednak były niższe od średniej wieloletniej (rys. 6.6). Wiosną i jesienią tendencje wysokości opadów mieszanych są statystycznie nieistotne.

Istotne zmiany udziału opadów mieszanych w sumach ogólnych zachodziły głównie zimą, zarówno w sezonach, jak i miesiącach (z wyjątkiem lutego). W styczniu i grudniu udział opadów mieszanych wzrasta, odpowiednio o 13,1 i 10,5% na 100 lat. Trend wzrostowy w styczniu wynika raczej z małego udziału opadów mieszanych w sumach ogólnych w latach przypadających na wiek XIX oraz wyraźnej tendencji



Rys. 6.5. Przebieg sum opadów mieszanych w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 6.5. Variation of the mixed precipitation totals in snowfall season (Oct–May) and in winter; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)



Rys. 6.6. Kumulowane odchylenia sum opadów mieszanych w okresie śnieżnym (X–V) i w zimie od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 6.6. Cumulative deviations of the mixed precipitation totals in snowfall season (Oct–May) and in winter from the multiannual average (1863–2008)

wzrostowej w tym okresie trwającej do końca lat 20. XX wieku. W grudniu natomiast zmiany mają charakter stopniowego wzrostu obejmującego całe badane wielolecie.

Wzrost udziału opadów mieszanych w ogólnej sumie opadów sezonu zimowego szacuje się na 9,6% na 100 lat. Trendy liniowe wyjaśniają niewielki procent wariancji tej charakterystyki opadów – co najwyżej 9,7% (zima) (tab. 6.6).

Temperatura powietrza niemal w ciągu całego roku istotnie kształtuje liczbę dni z opadem mieszanym (z wyjątkiem marca), przy czym charakter tych relacji ulega w ciągu roku zmianie. W zimie (wartości miesięczne i sezonowe) oraz w okresie śnieżnym wzrost temperatury powietrza oznacza równoczesny wzrost liczby dni z opadem mieszanym. Podobne wyniki w odniesieniu do północnej Eurazji uzyskał Ye (2008). W zimie wielkość wzrostu osiąga około 0,4 dnia na 1°C, a w okresie śnieżnym wynosi prawie 1 dzień na 1°C. Wartości współczynników regresji między temperaturą i charakterystykami opadów mieszanych dotyczące wszystkich rozpatrywanych miesięcy i sezonów zamieszczono w tabelach 6.7–6.8. W przejściowych porach roku, kwietniu i listopadzie, współczynniki regresji są ujemne, co oznacza, że wzrost temperatury powietrza przyczynia się do spadku częstości opadów mieszanych, podobnie jak na rozległych obszarach północnej Eurazji (Ye, 2008). Zależności te są szczególnie istotne w kwietniu (tab. 6.7). Pomimo silnej statystycznej istotności współczynników regresji, szczególnie w przypadku wartości miesięcznych, przebieg temperatury powietrza wyjaśnia stosunkowo niewielką część wariancji liczby dni

Tabela 6.6. Współczynniki trendu udziału (%) opadów mieszanych w ogólnej sumie opadów opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 6.6. Coefficient of trend of the contribution (%) of mixed precipitation to overall total precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (%/100 lat) Regression coefficient (%/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,069	+13,1 ± 4,0	0,0014	**
II	0,011	+5,5 ± 4,3	0,19	—
III	0,005	−3,7 ± 4,3	0,39	—
IV	0,009	+4,2 ± 3,7	0,25	—
...	—	—	—	—
XI	0,000	−0,9 ± 4,1	0,83	—
XII	0,054	+10,5 ± 3,7	0,004	**
III–V	0,001	−0,8 ± 2,0	0,69	—
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,002	−0,8 ± 1,6	0,59	—
XII–II	0,097	+9,6 ± 2,4	0,0001	***
X–V	0,026	+2,7 ± 1,4	0,05	*
VII–VI	0,040	+1,8 ± 0,7	0,015	*

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

Tabela 6.7. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność liczby dni z opadem mieszanym od średniej miesięcznej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 6.7. Linear regression coefficients describing dependency of number of days with mixed precipitation on average monthly temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/°C) Regression coefficient (days/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,169	$+0,24 \pm 0,05$	0,0000	***
II	0,190	$+0,26 \pm 0,04$	0,0000	***
III	0,006	$-0,06 \pm 0,07$	0,34	—
IV	0,207	$-0,42 \pm 0,07$	0,0000	***
...	—	—	—	—
XI	0,031	$-0,16 \pm 0,07$	0,033	
XII	0,081	$+0,23 \pm 0,07$	0,0005	***
III–V	0,058	$-0,52 \pm 0,18$	0,0034	**
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,063	$-0,43 \pm 0,14$	0,0022	**
XII–II	0,183	$+0,71 \pm 0,13$	0,0000	***
X–V	0,057	$+0,97 \pm 0,33$	0,0038	**
VII–VI	0,073	$+1,43 \pm 0,43$	0,00103	**

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

z opadem mieszanym. Wartość współczynnika determinacji jest najwyższa w kwietniu (20,7%), następnie w lutym (19,0%) i styczniu (16,9%), a w pozostałych miesiącach i sezonach, z wyjątkiem zimy, nie przekracza 9%. W porze zimowej temperatura powietrza wyjaśnia ponad 18% wariancji liczby dni z opadem mieszanym.

Ogólnie, opisany charakter zależności charakterystyk opadów mieszanych (sumy i ich udział w ogólnych sumach opadów) od średniej miesięcznej temperatury jest podobny jak w przypadku częstości ich występowania. Wzrost temperatury powietrza w styczniu i lutym powoduje spadek, a w kwietniu i listopadzie wzrost zarówno sum opadów mieszanych, jak i ich udziału w ogólnej sumie miesięcznej, z tym że zależność wysokości opadów od temperatury w listopadzie jest statystycznie nieistotna. Temperatura powietrza wyjaśnia największą część wariancji udziału opadów mieszanych w ogólnej sumie opadów lutego (13,1%) (tab. 6.8).

Wysokość opadów mieszanych jest znacząco kształtowana przez temperaturę powietrza również jesienią i w zimie. Temperatura istotnie determinuje także udział opadów mieszanych przypadających na ogólną sumę opadów w jesieni, zimie i okresie śnieżnym.

Współczynniki determinacji określające część wariancji tych charakterystyk opadów mieszanych wyjaśnioną przez zmienność temperatury sezonowej nie przekraczają 3,5% jesienią i wiosną, a w zimie osiągają 7,6% w przypadku sum opadów mieszanych i 9,6% w przypadku ich udziału w sumie sezonowej (tab. 6.9). Pomimo

Tabela 6.8. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność sum opadów mieszanych od średniej miesięcznej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 6.8. Linear regression coefficients describing dependency of total mixed precipitation on average temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/°C) Regression coefficient (mm/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,103	$+0,91 \pm 0,22$	0,0001	***
II	0,108	$+0,82 \pm 0,20$	0,0001	***
III	0,008	$-0,37 \pm 0,36$	0,29	—
IV	0,046	$-1,38 \pm 0,53$	0,0095	**
...	—	—	—	—
XI	0,014	$-0,63 \pm 0,43$	0,14	—
XII	0,019	$+0,51 \pm 0,31$	0,096	—
III–V	0,019	$-1,60 \pm 0,96$	0,096	—
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,035	$-1,87 \pm 0,81$	0,022	*
XII–II	0,076	$+2,02 \pm 0,58$	0,007	***
X–V	0,014	$+2,34 \pm 1,70$	0,16	—
VII–VI	0,015	$+3,19 \pm 2,17$	0,14	—

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

Tabela 6.9. Wartości współczynników regresji liniowej opisującej zależność udziału opadów mieszanych w ogólnej sumie opadów od średniej temperatury powietrza (1863–2008)

Table 6.9. Linear regression coefficients describing the dependency of the contribution of mixed precipitation to overall total precipitation on average temperature (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (%/°C) Regression coefficient (%/°C)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
I	0,095	$+1,94 \pm 0,50$	0,0002	***
II	0,131	$+2,33 \pm 0,50$	0,0000	***
III	0,018	$-1,20 \pm 0,73$	0,10	—
IV	0,069	$-2,68 \pm 0,82$	0,0014	**
...	—	—	—	—
XI	0,049	$-2,16 \pm 0,80$	0,0074	**
XII	0,009	$+0,70 \pm 0,60$	0,24	—
III–V	0,025	$-1,18 \pm 0,61$	0,056	—
VI–VIII	—	—	—	—
IX–XI	0,030	$+0,99 \pm 0,47$	0,037	*
XII–II	0,096	$+1,76 \pm 0,45$	0,0001	***
X–V	0,018	$+0,51 \pm 0,32$	0,11	—
VII–VI	0,095	$+1,94 \pm 0,50$	0,0002	***

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

statystycznie istotnych związków regresyjnych między charakterystykami opadów mieszanych i temperaturą powietrza wyjaśnia ona stosunkowo niewielki procent ich wariancji.

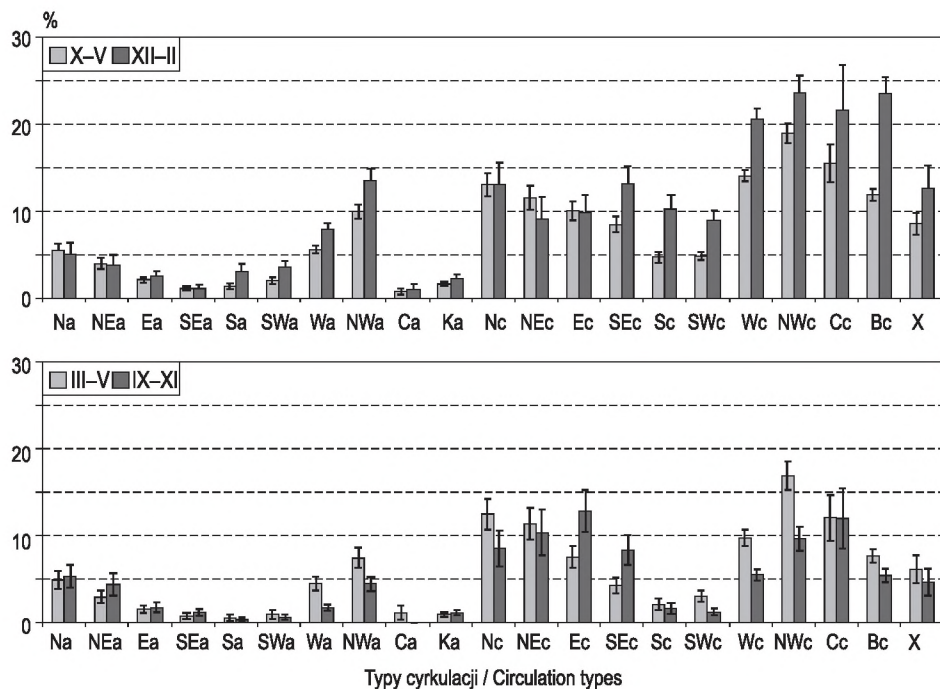
6.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady mieszane

6.3.1. Związek opadów mieszanych z typami cyrkulacji

Częstość występowania opadów mieszanych jest związana z kierunkiem napływu mas powietrznych oraz rodzajem oddziałującego układu barycznego. W każdym z badanych okresów średnie prawdopodobieństwo wystąpienia opadów mieszanych w typach cyklonalnych jest kilkakrotnie większe niż w typach antycyklonalnych (tab. 6.10). Występowaniu opadów mieszanych w okresie śnieżnym, zimą oraz jesienią najbardziej sprzyja napływ powietrza z północo-zachodu w zasięgu niżu (NWc). Dni z opadem mieszanym stanowią około 24% spośród dni z cyrkulacją typu NWc zimą, 19% w okresie śnieżnym i prawie 17% jesienią. Ogólnie największym prawdopodobieństwem wystąpienia opadów mieszanych odznacza się zima. W tej porze roku typami cyrkulacji sprzyjającymi ich wystąpieniu, oprócz wymienionego już NWc, jest Bc (23,4%) oraz Cc (21,7%) i Wc (20,6%). Możliwość wystąpienia opadów mieszanych w pozostałych typach cyklonalnych zmienia się od 9% (SWc) do ponad 13% (Nc, SEc). Cyrkulacja atmosfery podobnie kształtuje ich częstość w okresie śnieżnym i wiosną, przy czym zróżnicowanie prawdopodobieństwa w typach najbardziej sprzyjających ich występowaniu (NWc, Bc, Cc, Wc) jest wtedy większe niż w zimie (rys. 6.7). Ponadto wraz ze zmianą kierunku napływu powietrza z N do SE w układzie cyklonalnym stopniowo zmniejsza się prawdopodobieństwo wystąpienia opadów mieszanych z 13,7% (Nc) do 4,7% (Sc) w okresie śnieżnym i odpowiednio z 12,5 do 2,1% wiosną. Jesienią te zależności ulegają pewnej zmianie – występowaniu opadów mieszanych najbardziej sprzyja cyrkulacja typu Ec (12,8%). W tej porze roku pojawiają się one z podobną częstością, kiedy nad południową Polską zalega centrum niżu (prawdopodobieństwo 12,0%). We wszystkich rozpatrywanych okresach opady mieszane są najmniej prawdopodobne podczas zalegania centrum wyżu lub klina wysokiego ciśnienia (rys. 6.7). Warto zwrócić uwagę, że zimą prawdopodobieństwo występowania opadów mieszanych w antycyklonalnym typie NWa (13,5%) jest podobne jak w niektórych typach cyklonalnych (np. Nc 13,1%).

W Krakowie zachodzą rozbieżności między typami cyrkulacji najbardziej sprzyjającymi występowaniu opadów mieszanych i typami charakteryzującymi się najwyższymi sumami dobowymi. W większości rozpatrywanych sezonów, z wyjątkiem wiosny, najwyższe średnie sumy dobowe są związane z napływem powietrza z północo-wschodu w układzie niżowym (rys. 6.8). Średni dobowy opad w dniach z typem NEc zmienia się od 4,7 mm w zimie do 10,4 mm jesienią.

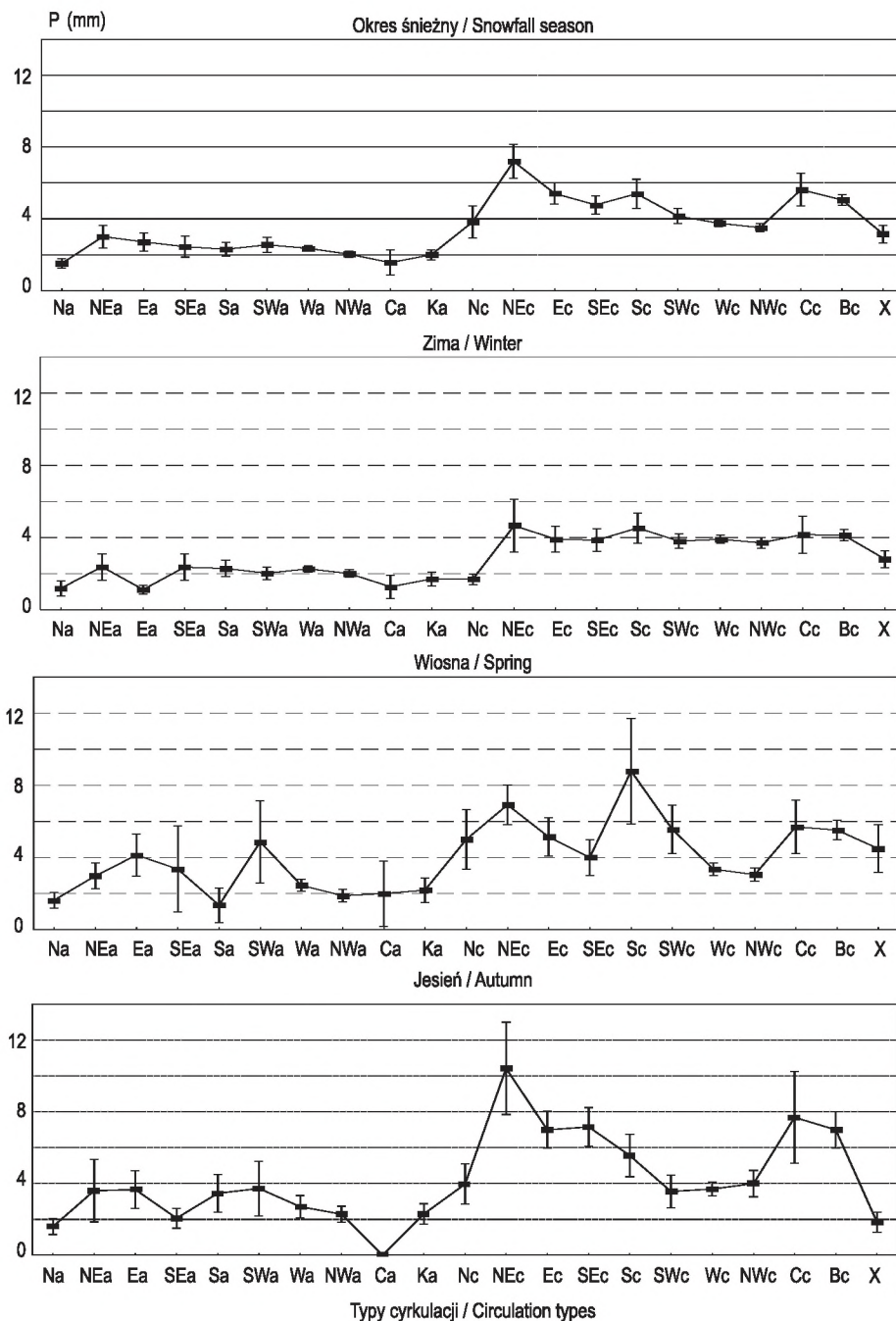
Jak wykazano wcześniej, opady mieszane są najbardziej prawdopodobne w zimie, lecz ich wysokość wówczas jest najniższa. Średni dobowy opad w typach cyklo-



Rys. 6.7. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu mieszanego i jego błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 6.7. Conditional probability (%) of mixed precipitation by circulation type and its standard error (1874–2008)

nalnych osiąga wtedy tylko 3,4 mm. Najwyższe średnie dobowe sumy opadów mieszanych w typach cyklonalnych występują jesienią (5,7 mm) (tab. 6.10). Sezonowe zróżnicowanie wysokości opadów mieszanych zapewne wynika z sezonowo zróżnicowanego udziału opadów śniegu i deszczu w każdym przypadku opadów mieszanych. W zimie w opadzie mieszanym przeważa mniej wydajny śnieg, w przejściowych porach roku natomiast bardziej wydajny deszcz. W zimie i w okresie śnieżnym stosunkowo wysokie sumy dobowe są również w dniach z typami Sc (odpowiednio 4,5 i 5,4 mm), Cc (odpowiednio 4,2 i 5,6 mm) i Bc (odpowiednio 4,1 i 5,1 mm). Podczas napływu ciepłego powietrza z południa większą część opadów mieszanych stanowią opady ciekłe, natomiast podczas napływu powietrza z NE w układzie niżowym dużą rolę w powstawaniu opadów odgrywa orograficzna bariera Karpat. Największym zróżnicowaniem sum opadów mieszanych odznaczają się typy cyrkulacji Nc (okres śnieżny, opad maksymalny 78,8 mm) i typ Wc (zima, opad maksymalny 27,4 mm) (rys. 6.9). Jesienią zależności wysokości opadu dobowego od regionalnej cyrkulacji atmosferycznej są podobne jak w okresie śnieżnym, z tym że średnie dobowe sumy są wyższe (rys. 6.9), osiągające 10,4 mm w typie NEc, 7,7 mm w typie Cc i 7,0 mm w typie Bc. Ponadto jesienią sumy w typach Ec (7,0 mm) i SEc (7,2 mm)



Rys. 6.8. Średnie dobowe sumy opadów mieszanych i ich błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 6.8. Average daily totals of mixed precipitation by circulation type and their standard errors (1874–2008)

Tabela 6.10. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów mieszanych oraz ich błędy standardowe w typach cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej (1874–2008)

Table 6.10. Conditional probability and daily totals of mixed precipitation and their standard errors for cyclonic and anticyclonic circulation types (1874–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
			Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	a	c	a		c	
III–V	2,5 ± 0,2	8,4 ± 0,4	2,7 ± 1,1	16,3	4,8 ± 1,2	78,8
VI–VIII	–	–	–	–	–	–
IX–XI	1,7 ± 0,2	5,8 ± 0,3	2,8 ± 0,9	20,8	5,7 ± 1,2	41,0
XII–II	4,8 ± 0,3	17,1 ± 0,6	1,9 ± 0,4	10,0	3,4 ± 0,6	27,4
X–V	3,4 ± 0,1	11,4 ± 0,3	2,2 ± 0,4	20,8	4,4 ± 0,6	78,8

są nieco wyższe niż w typie Sc (5,6 mm). Opady mieszane w ogóle nie pojawiają się w typie cyrkulacji Ca. Wiosną najwyższe mieszane opady dobowe są związane przede wszystkim z typem Sc (8,8 mm), a w pozostałych typach cyklonalnych zmieniają się od 3,1 mm w typie NWc do 6,9 mm w typie NEc (rys. 6.8).

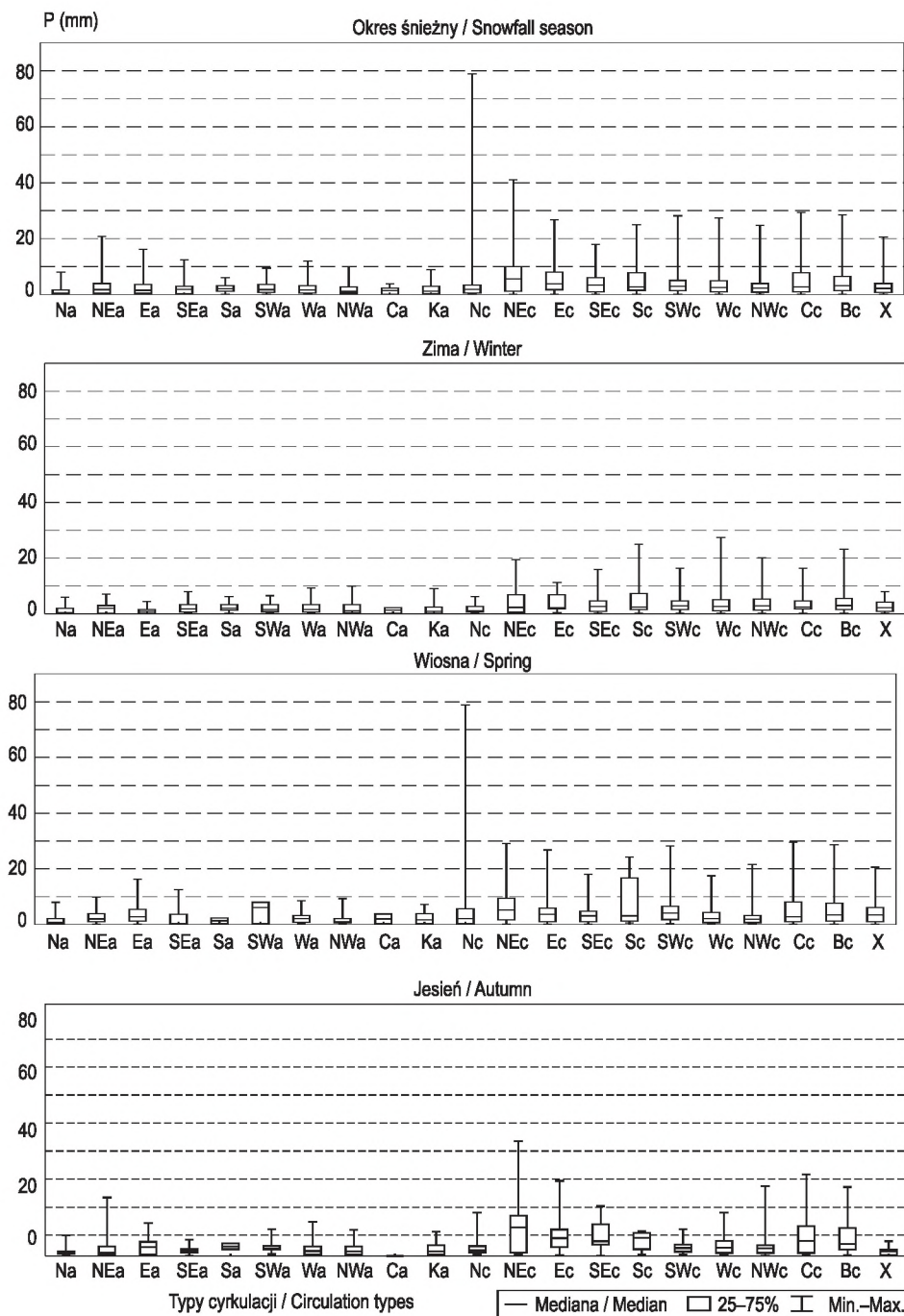
6.3.2. Związek opadów mieszanych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi

We wszystkich porach roku jest zauważalna zależność występowania opadów mieszanych od typu napływającej masy powietrznej, o czym świadczy zróżnicowanie prawdopodobieństwa wystąpienia tego typu opadów (rys. 6.10).

W okresie śnieżnym opady mieszane pojawiają się najczęściej w dniach z napływem różnych mas powietrznych (prawdopodobieństwo 14,2%), nieznacznie rzadziej podczas napływu powietrza polarnego morskiego (11,1%), arktycznego (10,2%). Najmniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia opadów mieszanych zachodzi w suchszych masach powietrza polarnego kontynentalnego (1,7%).

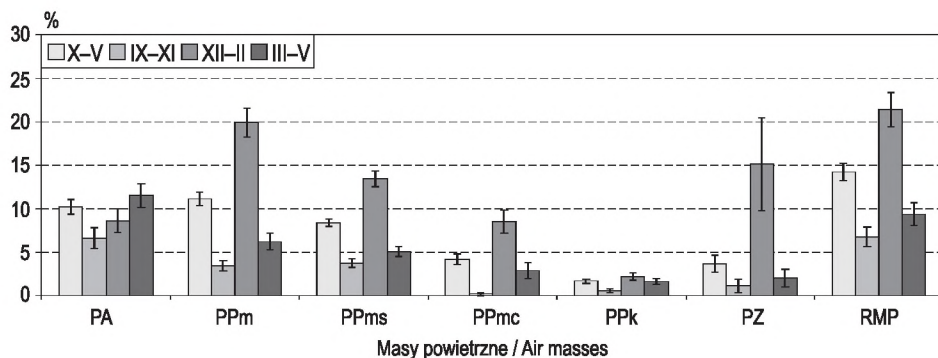
Opisany charakter zależności dotyczy również pór roku, przy czym można tutaj wskazać pewne charakterystyczne cechy sezonowe. Zimą opady mieszane podczas napływu PPM (19,9%) są niemal tak samo prawdopodobne jak podczas napływu RMP (21,4%), spada natomiast prawdopodobieństwo ich wystąpienia w chłodnym PA (8,6%). W przejściowych porach roku natomiast wraz z napływem PA opady mieszane mogą pojawiać się porównywalnie często (jesienią – 6,6%), a wiosną nawet częściej (11,5%) niż podczas napływu RMP (jesień – 6,7%; wiosna – 9,4%). Ponadto napływ PPMC jesienią niemal eliminuje możliwość wystąpienia opadów mieszanych (prawdopodobieństwo 0,2%) (rys. 6.10).

We wszystkich rozpatrywanych okresach średnia wysokość dobowych opadów mieszanych podczas napływu ciepłych mas powietrza zwrotnikowego jest zdecy-



Rys. 6.9. Charakterystyki statystyczne sum dobowych opadów mieszanych w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 6.9. Statistical characteristics of daily mixed precipitation totals by circulation type (1874–2008)



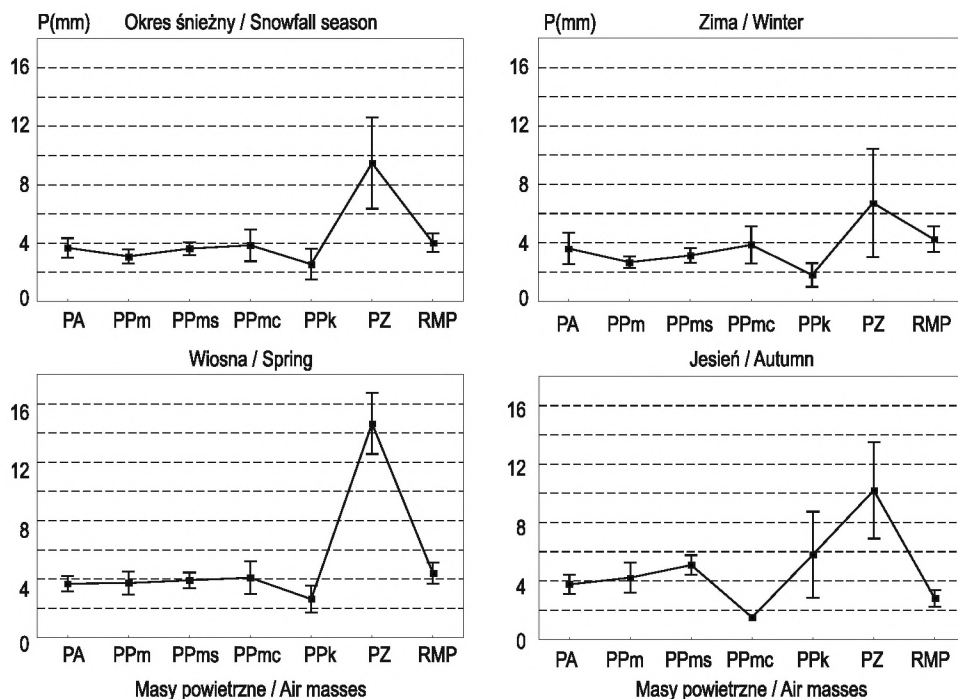
Rys. 6.10. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadów mieszanych i jego błąd standardowy w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 6.10. Conditional probability (%) of mixed precipitation by air mass and its standard error (1951–2008)

dowanie wyższa niż w każdej pozostałej masie powietrznej i zmienia się od 6,7 mm zimą do 14,7 mm wiosną (rys. 6.11), przy czym należy jeszcze raz zwrócić uwagę na małą reprezentatywność tej średniej, związaną z niewielką liczbą przypadków. Warto również zaznaczyć, że maksima dobowe opadów były związane w każdym okresie z innym typem masy powietrznej, a nigdy nie były to masy PZ (rys. 6.12). Zakres zmian średnich sum dobowych opadu mieszanego, pomijając masy PZ, osiąga 1,5 mm w okresie śnieżnym, 2,4 mm zimą, 1,8 mm wiosną i 4,3 mm jesienią. W większości okresów najwyższe średnie sumy dobowe towarzyszą napływowi RMP (okres śnieżny – 4,0 mm, zima – 4,2 mm, wiosna – 4,4 mm), tylko jesienią najwyższe sumy daje napływ mas PPk (5,8 mm), któremu w pozostałych okresach odpowiadają najniższe sumy średnie (okres śnieżny i wiosna – 2,6 mm, zima – 1,8 mm) (rys. 6.11). Średni dobowy opad w masach PPk jesienią jest obciążony stosunkowo dużym błędem standardowym.

Większość opadów mieszanych formuje się na frontach atmosferycznych. W każdej porze roku średnie prawdopodobieństwo ich wystąpienia w dniach z frontem (od 5,1% jesienią do 19,6% zimą) jest większe niż w dniach bez frontów (od 1,9% jesienią do 5,9% zimą) (tab. 6.11).

W zimie oraz w całym okresie śnieżnym (od października do maja) opady mieszane zdarzają się najczęściej podczas przejścia różnych frontów, przy czym w zimie możliwość ich pojawienia się w takich dniach (24,0%) jest wyraźnie większa niż w okresie śnieżnym (15,9%). W obydwóch tych okresach opady mieszane najrzadziej towarzyszą frontowi stacjonarnemu (zima – 12,3%, okres śnieżny – 8,2%). Możliwość wystąpienia takich opadów podczas pozostałych rodzajów frontów (chłodny, ciepły, okluzji) jest zbliżona (rys. 6.13): zimą zmienia się od 18,0% podczas frontu chłodnego do 19,5% podczas frontu ciepłego, a w okresie śnieżnym od 10,8% podczas frontu chłodnego do 13,7% podczas frontu okluzji.



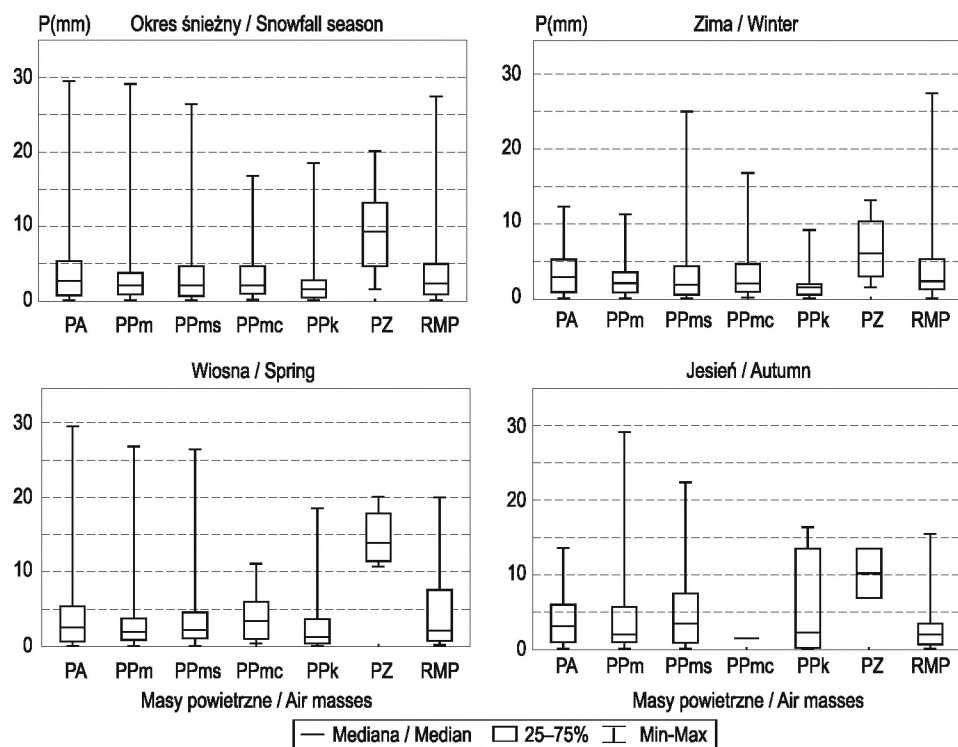
Rys. 6.11. Średnie dobowe sumy opadów mieszanych i ich błąd standardowy w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 6.11. Average daily totals of mixed precipitation by air mass and their standard error (1951–2008)

Tabela 6.11. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów mieszanych wewnątrzmasowych i frontowych oraz ich błędy standardowe (1951–2008)

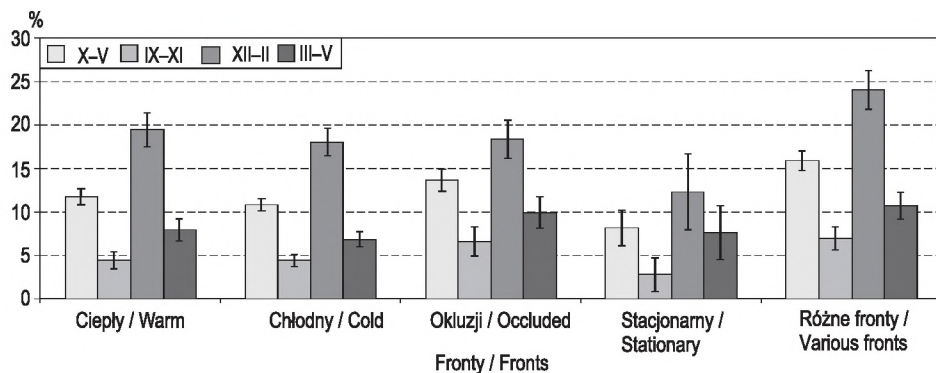
Table 6.11. Conditional probability and daily totals of air mass and frontal mixed precipitation and their standard errors (1951–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
	Opady / Precipitation		Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	wewnątrzmasowe air-mass	frontowe frontal	wewnątrzmasowe air-mass		frontowe frontal	
III–V	3,2 ± 0,3	8,4 ± 0,6	3,6 ± 0,5	26,8	3,9 ± 0,7	29,5
VI–VIII	–	–	–	–	–	–
IX–XI	1,9 ± 0,2	5,1 ± 0,5	3,8 ± 0,7	29,1	5,8 ± 2,0	22,4
XII–II	5,9 ± 0,4	19,6 ± 0,9	2,5 ± 0,2	16,8	3,6 ± 0,5	27,4
X–V	4,1 ± 0,2	12,5 ± 0,5	3,0 ± 0,2	29,1	3,9 ± 0,4	29,5



Rys. 6.12. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów mieszanych w masach powietrznych (1951–2008)

Fig. 6.12. Statistical characteristics of daily mixed precipitation totals by air mass (1951–2008)

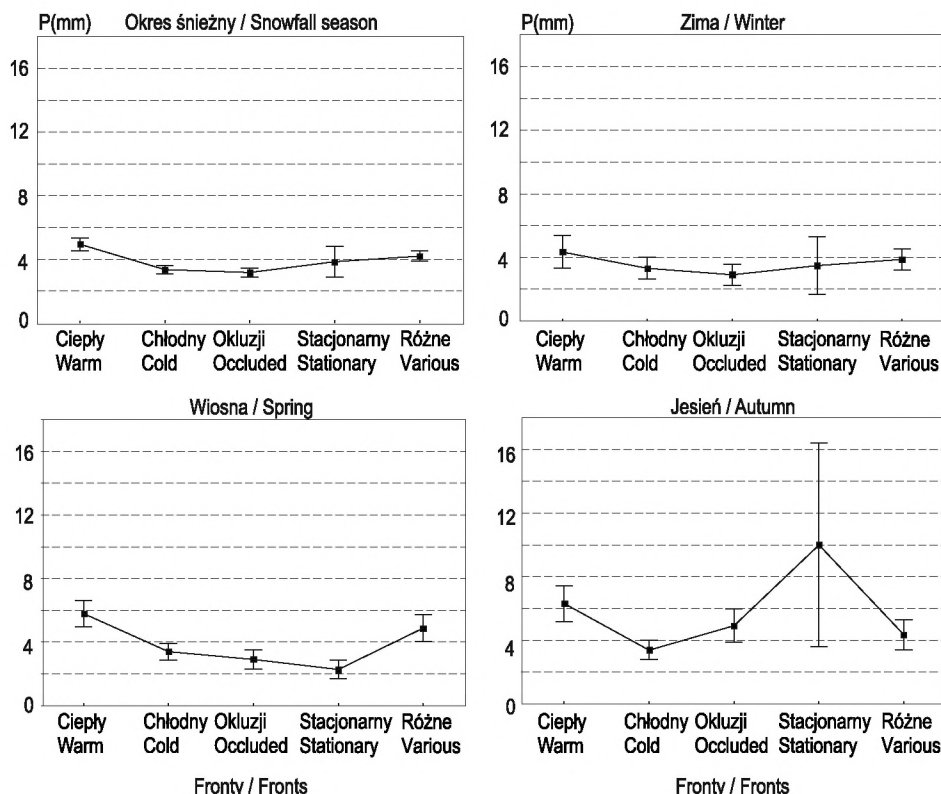


Rys. 6.13. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu mieszane i jego błąd standardowy na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 6.13. Conditional probability (%) of mixed precipitation by type of front and its standard error (1951–2008)

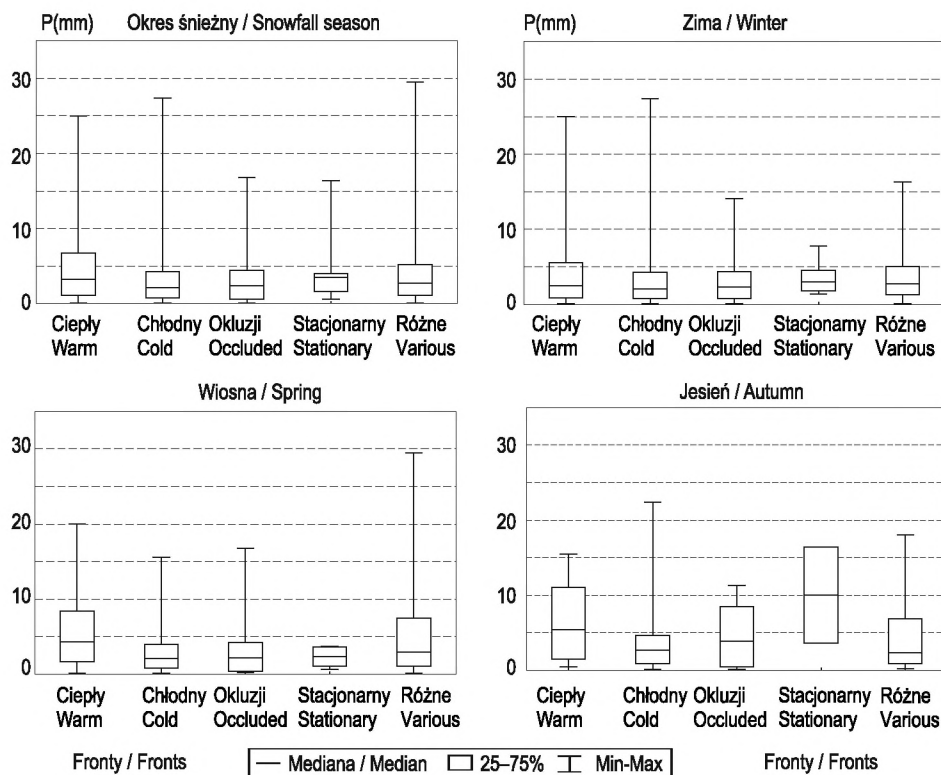
W przejściowych porach roku zakres zmian prawdopodobieństwa wystąpienia opadów mieszanych w zależności od rodzaju frontu jest niewielki: od 6,8% (front chłodny) do 10,7% (różne fronty) wiosną oraz od 2,8% (front stacjonarny) do 7,0% (różne fronty) jesienią. W przejściowych porach roku opad mieszany związany z frontem okluzji pojawia się z podobnym prawdopodobieństwem jak opady pochodzące z różnych frontów (rys. 6.13).

W większości rozpatrywanych okresów najwyższe średnie dobowe sumy opadów mieszanych towarzyszą frontowi ciepłemu (okres śnieżny – 4,9 mm, zima – 4,3 mm, wiosna – 5,8 mm). Jedynie jesienią front stacjonarny sprowadza średnio wyższe opady (10,0 mm) niż front ciepły (6,3 mm), przy czym wartość średnia opadu na froncie stacjonarnym jest obarczona sporym błędem ze względu na małą liczbę takich przypadków (rys. 6.14). W rozpatrywanym wieloleciu najwyższe dobowe sumy opadów w każdym z badanych okresów towarzyszyły jednak różnym rodzajom frontów (rys. 6.15), co może sugerować, że zależność wysokości opadu



Rys. 6.14. Średnie dobowe sumy opadów mieszanych i ich błąd standardowy na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 6.14. Average daily totals of mixed precipitation by type of front and their standard error (1951–2008)



Rys. 6.15. Charakterystyki statystyczne dobowych sum opadów mieszanych na frontach atmosferycznych (1951–2008)

Fig. 6.15. Statistical characteristics of daily mixed precipitation totals by type of front (1951–2008)

mieszanego od rodzaju frontu nie jest oczywista, szczególnie w przypadku opadów najwyższych. Zimą maksymalny opad dobowy, przekraczający 27 mm, pojawił się w dniu z frontem chłodnym, przy czym najwyższy opad na froncie ciepłym w tej porze jest niemal równie wysoki (25 mm). Wiosenne maksimum opadowe, będące równocześnie najwyższym w wieloleciu mieszanym opadem dobowym (29,5 mm), pojawiało się natomiast w dniu przejścia różnych frontów, a jesienią najwyższy opad dobowy, przekraczający 29 mm, wystąpił w jednorodnej masie powietrznej (brak frontów). W zimie, na wiosnę oraz w okresie śnieżnym względnie wysokie średnie opady dobowe zdarzają się również w dniach z przejściem różnych frontów (odpowiednio 3,9, 4,9 i 4,2 mm) oraz podczas frontu stacjonarnego (tylko w zimie – 3,5 mm i w okresie śnieżnym – 3,9 mm) (rys. 6.14). Najniższe średnie sumy dobowe opadów mieszanych, oprócz dni bez frontów, są związane z frontem okluzji w zimie (2,9 mm) i w okresie śnieżnym (3,2 mm), z frontem stacjonarnym (2,3 mm) wiosną oraz z frontem chłodnym (3,4 mm) jesienią (rys. 6.14).

6.3.3. Związek opadów mieszanych ze wskaźnikami cyrkulacji

Zarówno wysokość, jak i częstość opadów mieszanych wykazują silniejszy związek z regionalną cyrkulacją (wskaźniki W, S i C) niż z makroskalową Oscylacją Północnoatlantycką (wskaźnik NAO).

Największy wpływ na częstość opadów mieszanych, oceniony na podstawie liczby okresów z istotnymi współczynnikami regresji, wywiera cyrkulacja południkowa oraz stopień cykloniczności (wskaźniki S i C, tab. 6.12).

Wskaźnik cyrkulacji południkowej S wykazuje istotny związek statystyczny z częstością opadów mieszanych w ciągu całego roku, w tym najsilniej w listopadzie, grudniu, marcu i kwietniu ($p < 0,000$). W wyniku zależności korelacyjne jesienią są statystycznie silniejsze niż w pozostałych sezonach. Wraz z intensyfikacją napływu powietrza z południa wzrasta częstość dni z opadem mieszanym. Zmienność cyrkulacji południkowej S wyjaśnia jednak stosunkowo niewielką część wariancji liczby dni z opadem mieszanym. Współczynnik determinacji jest największy w kwietniu, ale osiąga tylko 18,6%. Cyrkulacja południkowa S wyjaśnia ponad 10% wariancji liczby dni z opadem mieszanym tylko jeszcze w listopadzie i grudniu (tab. 6.12).

Wpływ cykloniczności (wskaźnik C) na częstość opadów mieszanych stwierdzono przede wszystkim w zimie, kiedy wyjaśnia on od 9,7% (grudzień) do 13,0% (styczeń) wariancji częstości takich opadów. W tym wypadku współczynniki korelacji są dodatnie, co oznacza, że im częstsze jest oddziaływanie układu niskiego ciśnienia, tym więcej jest dni z opadem mieszanym, co jest zgodne w wcześniejszą analizą związków z typami cyrkulacji. Wskaźnik C w ogóle nie wykazuje związku statystycznego z częstością opadów mieszanych jesienią. Związki częstości opadów mieszanych z cyrkulacją strefową (wskaźnik W) są istotne tylko w pierwszych 3 miesiącach roku, a spośród sezonów tylko wiosną. Wzrost intensywności przepływu zachodniego prowadzi do istotnego wzrostu częstości występowania opadów mieszanych, ale wyjaśnia tylko co najwyżej 17% (luty) ich wariancji (tab. 6.12).

Cyrkulacja Północnoatlantycka (wskaźnik NAO), która znacząco kształtuje charakterystyki opadów śnieżnych, wykazuje znacznie słabszy wpływ na częstość opadów mieszanych. Zarówno istotność współczynników korelacji, jak i procent wyjaśnionej przez wskaźnik NAO wariancji są niższe. Niemniej jednak w styczniu, lutym, kwietniu i listopadzie, a także jesienią omawiane zależności są statystycznie istotne, przy czym wskaźnik NAO wyjaśnia wyjątkowo niewielką część wariancji częstości opadów mieszanych (tab. 6.12). Warto również zwrócić uwagę na to, że charakter związków korelacyjnych ulega w ciągu roku zmianie. Wzrost wartości wskaźnika NAO w styczniu i lutym powoduje wzrost częstości opadów mieszanych, w kwietniu i listopadzie zaś zależności są odwrotne.

Wieloletnia zmienność wysokości opadów mieszanych jest pozytywnie skorelowana ze zmianami częstości oddziaływania układów niskiego ciśnienia, z wyjątkiem kwietnia oraz jesieni. Wskaźnik cykloniczności wyjaśnia ponad 10% wariancji sum opadów mieszanych w styczniu, lutym oraz w zimie i okresie śnieżnym. Wysokość opadów mieszanych istotnie zależy również od intensywności napływu powietrza z południa w marcu, kwietniu, grudniu oraz w zimie, przy czym tylko w grudniu

Tabela. 6.12. Współczynniki korelacji (r) między liczbą dni z opadem mieszanym a wskaźnikami cyrkulacji: R^2 – współczynnik determinacji, α – istotność współczynnika r (1874–2008)

Table 6.12. Correlation coefficients (r) between the number of days with mixed precipitation and circulation indices: R^2 – coefficient of determination, α – statistical significance of r coefficient (1874–2008)

Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2
I	0,191	*	0,037	0,351	***	0,123	-0,226	**	0,051	0,360	***	0,130
II	0,231	**	0,053	0,420	***	0,177	-0,175	*	0,031	0,328	***	0,108
III	-0,020	—	0,000	0,248	**	0,062	-0,307	***	0,094	0,301	***	0,091
IV	-0,205	*	0,042	0,125	—	0,016	-0,431	***	0,186	0,104	—	0,011
...	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
XI	-0,219	*	0,048	0,159	—	0,025	-0,374	***	0,140	0,232	**	0,054
XII	0,068	—	0,005	0,064	—	0,004	-0,408	***	0,166	0,312	***	0,097
III–V	-0,105	—	0,011	0,270	**	0,073	-0,266	**	0,071	0,221	**	0,049
VI–VIII	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IX–XI	-0,190	*	0,036	0,001	—	0,000	-0,310	***	0,096	0,076	—	0,006
XII–II	0,089	—	0,008	-0,029	—	0,001	-0,290	**	0,084	0,315	***	0,099
X–V	-0,102	—	0,010	0,076	—	0,006	-0,204	*	0,042	0,323	***	0,104
VII–VI	-0,130	—	0,017	0,241	**	0,058	-0,166	—	0,027	0,348	***	0,121

¹ $\alpha > 0,05$ – —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Tabela. 6.13. Współczynniki korelacji (r) między sumami opadów mieszanych a wskaźnikami cyrkulacji: R^2 – współczynnik determinacji, α – istotność współczynnika r (1874–2008)

Table 6.13. Correlation coefficients (r) between total mixed precipitation and circulation indices: R^2 – coefficient of determination, α – statistical significance of r coefficient (1874–2008)

Okres Period	Wskaźnik / Index											
	NAO			W			S			C		
	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2	r	α^1	R^2
I	0,005	–	0,000	0,153	–	0,023	–0,061	–	0,004	0,408	***	0,167
II	0,137	–	0,019	0,343	***	0,118	–0,063	–	0,004	0,352	***	0,124
III	–0,047	–	0,002	0,075	–	0,006	–0,173	*	0,030	0,203	*	0,041
IV	0,001	–	0,000	0,046	–	0,002	–0,221	**	0,049	0,130	–	0,017
...	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
XI	–0,226	**	0,051	0,033	–	0,001	–0,155	–	0,024	0,315	***	0,099
XII	0,031	–	0,001	–0,027	–	0,001	–0,360	***	0,130	0,266	**	0,071
X–V	–0,145	–	0,021	0,034	–	0,001	–0,075	–	0,006	0,330	***	0,109
VII–VI	–0,196	*	0,038	0,112	–	0,013	–0,013	–	0,000	0,303	***	0,092
III–V	–0,133	–	0,018	0,067	–	0,004	–0,025	–	0,001	0,228	**	0,052
VI–VIII	–	–		–	–		–	–		–	–	
IX–XI	–0,104	–	0,011	–0,075	–	0,006	–0,120	–	0,014	0,148	–	0,022
XII–II	–0,029	–	0,001	–0,043	–	0,002	–0,172	*	0,029	0,341	***	0,116

¹ $\alpha > 0,05$ – –; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

współczynnik determinacji przekracza 10% (tab. 6.13). Cyrkulacja strefowa opisana zarówno przez regionalny wskaźnik W, jak i makroskalowy wskaźnik NAO odgrywa niewielką rolę w kształtowaniu wysokości opadów mieszanych. W przypadku wskaźnika W współczynnik korelacji jest istotny tylko w lutym, kiedy wyjaśnia prawie 12% wariancji sum opadów mieszanych. Ze wskaźnikiem NAO są istotnie skorelowane sumy opadów mieszanych tylko w listopadzie (tab. 6.13).

Podsumowując, należy zauważyć, że cyrkulacja atmosferyczna wywiera silniejszy wpływ na wieloletnią zmienność częstości opadów mieszanych niż na ich sumy. Zarówno w przypadku liczby dni, jak i wysokości tych opadów istotne znaczenie ma częstość występowania niżu (wskaźnik C). Na wieloletnią zmienność częstości opadów mieszanych wpływ wywiera również częstość i intensywność napływu powietrza z południa (wskaźnik S).

7. OPADY BURZOWE I GRADY

7.1. Występowanie i sumy opadów burzowych

W Krakowie występuje przeciętnie około 25 dni z burzą w ciągu roku (łącznie z burzami odległymi). Wartość ta jest nieco wyższa od średniej w Polsce, gdzie wielkość ta zmienia się od poniżej 15 dni w obszarach nadmorskich do ponad 30 dni w Karpatach (Bielec-Bąkowska, 2002; Woś, 2010). Burzom towarzyszą zwykle silne ulewę, a niekiedy nawet deszcze nawalne. W niniejszym opracowaniu rozpatrywane są tylko te dni z burzą, w których w miejscu obserwacji występował opad co najmniej 0,1 mm. W Krakowie tak zdefiniowane opady burzowe występowały średnio w 22 dniach, co stanowi około 6% dni w roku i 13% wszystkich dni z opadem $\geq 0,1$ mm (tab. 7.1).

Niemal 96% dni z opadem burzowym pojawia się w półroczu letnim (IV–IX), a ponad 66% tych dni występuje w lecie (VI–VIII). Jednak raz lub 2 razy w dziesięcioleciu zdarzają się opady burzowe w miesiącach zimowych, także z opadem śniegu lub śniegu z deszczem (kod 7). Sytuacje takie są możliwe najczęściej przy przechodzeniu aktywnych frontów atmosferycznych. Do wyjątkowych pod tym względem można zaliczyć styczeń 1976 roku i luty roku 1999, bowiem w tych miesiącach aż czterokrotnie zdarzyły się opady burzowe. W przebiegu rocznym najczęstsze występowanie opadów burzowych przypada na lipiec. Najwięcej dni z opadem burzowym było jednak w sierpniu 1937 roku (14 dni) i o jeden dzień mniej w lipcu 1899 roku (13 dni). W miesiącach letnich dni z opadem burzowym stanowią 32–39% wszystkich dni z opadem $\geq 0,1$ mm (tab. 7.1).

Do niebezpiecznych zjawisk pogodowych należą burze gradowe. Cechują się krótkim czasem trwania, ale ich wystąpieniu towarzyszą poważne utrudnienia w komunikacji i transporcie oraz duże straty finansowe, zwłaszcza w rolnictwie. Okolice Krakowa znajdują się w trzeciej strefie o bardzo dużym (16–20%) stopniu ryzyka pólów w podziale Polski na strefy szkód gradowych w rolnictwie (Kozłowski, 1963). Analizując liczbę miejscowości w Polsce, w których spadł grad w latach 1948–1950, A. Schmuck (1959) stwierdził, że gradobicia występują w okresie od kwietnia do września, dlatego też prawdopodobieństwo wystąpienia opadów gradu w Krakowie wyznaczono tylko w tej części roku (tab. 7.2). Zaledwie 4% dni z burzami gradowymi wystąpiło poza wymienionymi miesiącami (Twardosz i in., 2010b). W półroczu ciepłym prawdopodobieństwo wystąpienia opadów gradowych wynosi około 1%, z tym że dni z opadem gradowym stanowią 2,4% liczby dni z opadem.

Tabela 7.1. Liczba dni i prawdopodobieństwo wystąpienia opadów burzowych oraz ich błędy standardowe (1863–2008)

Table 7.1. Statistical characteristics of thunderstorm precipitation totals and their standard errors (1863–2008)

Okres Period	Dni z opadem Days with precipitation			Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) Probability of occurrence (%)	
	Śr. / Av.	Min.	Max.	Wystąpienia ¹ Occurrence ¹	Warunkowe ² Conditional ²
I	0,1 ± 0,1	0	4	0,5 ± 0,1	0,8 ± 0,2
II	0,2 ± 0,1	0	4	0,5 ± 0,2	0,9 ± 0,3
III	0,3 ± 0,1	0	3	0,9 ± 0,2	1,9 ± 0,3
IV	1,2 ± 0,1	0	7	3,8 ± 0,4	8,7 ± 0,9
V	4,1 ± 0,2	0	10	13,3 ± 0,5	29,8 ± 1,3
VI	5,0 ± 0,2	1	10	16,6 ± 0,6	34,6 ± 1,3
VII	5,6 ± 0,2	0	13	18,1 ± 0,7	39,2 ± 1,4
VIII	4,3 ± 0,2	1	14	13,9 ± 0,6	32,2 ± 1,3
IX	1,3 ± 0,2	0	6	4,4 ± 0,3	11,8 ± 1,0
X	0,2 ± 0,1	0	2	0,8 ± 0,1	2,4 ± 0,7
XI	0,1 ± 0,1	0	2	0,3 ± 0,1	0,6 ± 0,2
XII	0,1 ± 0,1	0	1	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1
IV–IX	21,5 ± 0,4	10	33	11,7 ± 0,2	25,7 ± 0,5
VI–VIII	14,9 ± 0,3	6	25	16,2 ± 0,4	34,7 ± 0,8
X–III	1,0 ± 1,0	0	7	0,5 ± 0,1	1,1 ± 0,1
I–XII	22,4 ± 0,4	10	35	6,1 ± 0,1	13,2 ± 0,3

¹ liczone w stosunku do liczby dni w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days

² liczone w stosunku do liczby dni z opadem w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days with precipitation

Największe zagrożenie wystąpieniem gradobić przypada na maj (1,9%) i czerwiec (1,7%), co zgadza się z danymi dotyczącymi całej Polski (Schmuck, 1959). Podobny rozkład miesięczny występowania gradów pojawia się także w innych obszarach Europy (Webb i in., 2001; Giaioti i in., 2003; Sioutas i in., 2003; Dimitrova i in., 2009; Sioutas i in., 2009).

W Krakowie w okresie 1863–2008 było 237 dni z burzami gradowymi (tab. 7.3), co stanowi 7,2% łącznej zanotowanej w tym okresie liczby 3275 dni z opadem burzowym. Burze gradowe w Krakowie zdarzają się przeciętnie w 16 dniach w dziesięcioleciu. Najczęściej występują w czerwcu i maju, a w przebiegu dobowym między godziną 15 a 16 CSE (Twardosz i in., 2010b). Ponadto zanotowano 89 przypadków gradu, który nie towarzyszył burzom. W sumie opady gradu, zarówno z burzą, jak i bez niej, stwierdzono w ciągu 326 dni, co daje przeciętne występowanie gradu w 22 dniach w dziesięcioleciu. W przebiegu rocznym burze gradowe najczęściej

Tabela 7.2. Prawdopodobieństwo wystąpienia opadów gradu i jego błąd standardowy (1863–2008)
Table 7.2. Probability of hail and its standard error (1863–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo wystąpienia (%) Probability of occurrence (%)	
	Wystąpienia ¹ Occurrence ¹	Warunkowe ² Conditional ²
IV	1,0 ± 0,2	2,2 ± 0,4
V	1,9 ± 0,2	3,9 ± 0,5
VI	1,7 ± 0,2	3,6 ± 0,5
VII	0,9 ± 0,1	1,8 ± 0,3
VIII	0,7 ± 0,1	1,4 ± 0,3
IX	0,5 ± 0,1	1,2 ± 0,3
X	0,3 ± 0,1	0,9 ± 0,3
IV–IX	1,1 ± 0,1	2,4 ± 0,2
VI–VIII	1,1 ± 0,1	2,3 ± 0,2

¹ liczone w stosunku do liczby dni w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days)

² liczone w stosunku do liczby dni z opadem w miesiącu/sezonie; calculated with reference to monthly/seasonal number of days with precipitation

występują w czerwcu (28,6%) i maju (28,2%), mimo że maksimum częstości burz przypada na lipiec (25%). W Krakowie maksimum majowe (28,3%) zaznacza się w przypadku wszystkich opadów gradu, zarówno z burzą, jak i bez niej.

Opad samego gradu trwa zwykle krótko – od kilku do kilkunastu minut. Większa część opadu pochodzi z deszczu ulewnego towarzyszącego burzy gradowej. Dlatego też nie ma możliwości przy obecnych technikach pomiarowych wyodrębnienia ilości opadu, jaki pochodzi z opadu gradu. Nie ma też sposobu obliczenia sumy opadów, jaka spada dokładnie w czasie trwania burzy, przy analizie opadów z rozdzielczością dobową. Stąd też informacje dotyczące dobowych sum opadów burzowych informują jedynie o ilości opadu, jaka wystąpiła w ciągu doby, w której wystąpiła burza. Tak rozumiane opady burzowe wynoszą przeciętnie 186 mm w ciągu roku i zmieniają się w szerokich granicach od 63 mm w roku 1954 aż do 366 mm w roku 1912 (tab. 7.4). W miesiącach letnich spada aż 72% wartości rocznej, a przeciętne sumy miesięczne opadów burzowych przekraczają 40 mm, osiągając maksimum w lipcu (51,5 mm). W półroczu letnim (IV–IX) spada średnio 181 mm opadów w połączeniu z burzami, co stanowi aż 97% rocznej sumy opadów burzowych.

Wyraźna sezonowość opadów burzowych wiąże się ze wzrostem temperatury powietrza w porze letniej, kiedy występuje maksimum rozwoju konwekcji termicznej, jednak zależność zarówno liczby dni z opadem burzowym, jak i sum tych opadów wyraża się dużym zróżnicowaniem (tj. dużym rozrzutem punktów na rys. 7.1). Na przykład najwyższa suma opadów burzowych w półroczu letnim 1912 roku przypadła na okres stosunkowo chłodny. W półroczu ciepłym jedynie liczba dni z opa-

Tabela 7.3. Liczba dni z opadem gradu ($\geq 0,1$ mm); wartości względne podano w % (1863–2008)Table 7.3. Number of days with hail (≥ 0.1 mm); relative values are expressed as percentages (1863–2008)

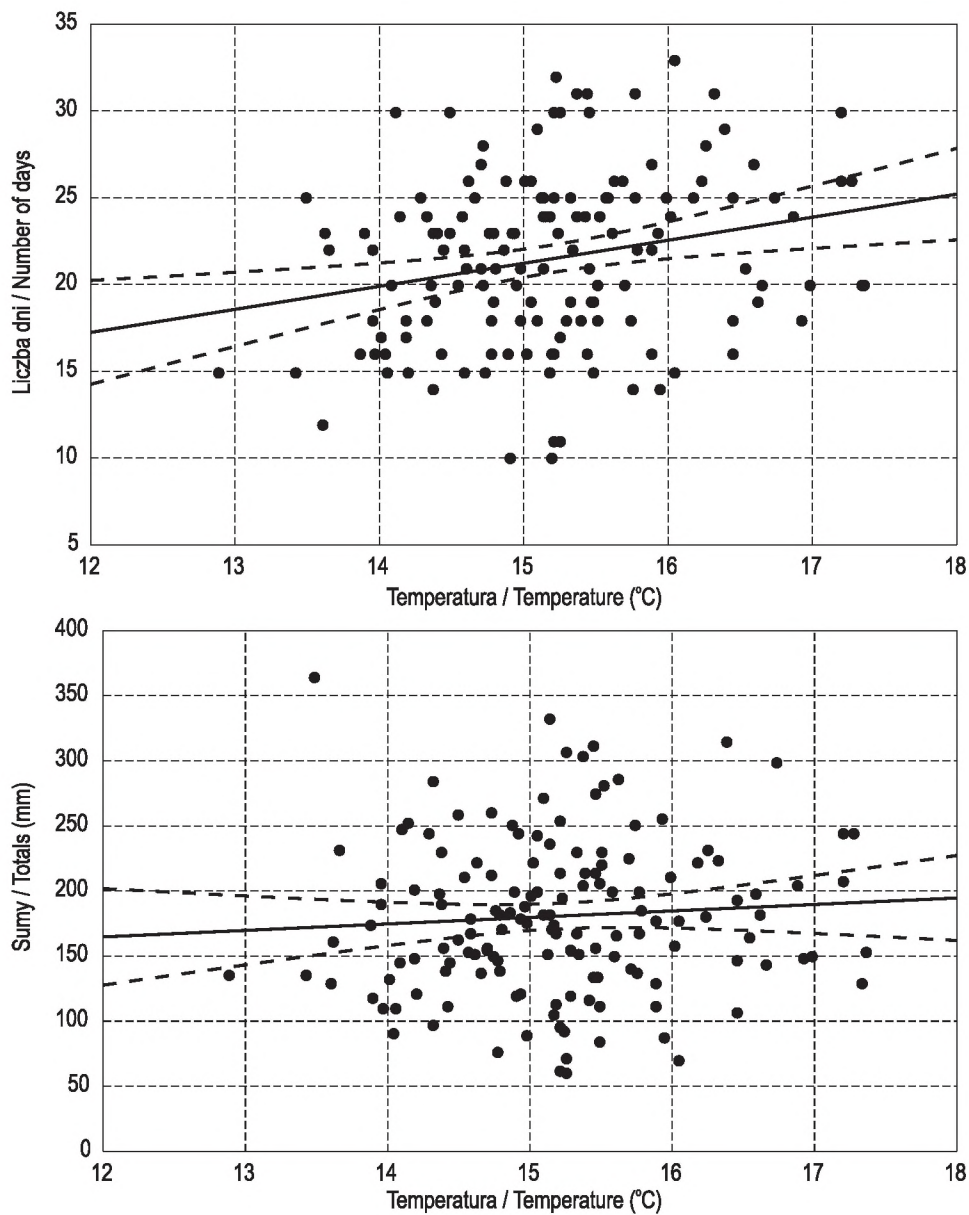
Okres Period	Dni z burzą gradową Days with thunderstorm with hail		Dni z gradem bez burzy Days with hail (without thunderstorm)		Razem dni z opadem gradu Total days with hail	
IV	20	8,8%	24	34,3%	44	14,8%
V	64	28,2%	20	28,6%	84	28,3%
VI	65	28,6%	11	15,7%	76	25,6%
VII	39	17,2%	2	2,9%	41	13,8%
VIII	26	11,5%	3	4,3%	29	9,8%
IX	13	5,7%	10	14,3%	23	7,7%
IV–IX	237	100,0%	89	100,0%	326	100,0%

Tabela 7.4. Sumy opadów burzowych, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności, γ_1 – skośność (błąd standardowy skośności wynosi 0,2) (1863–2008)Table 7.4. Totals of thunderstorm precipitation, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard deviation, V – coefficient of variability, γ_1 – skewness (standard error of skewness = 0.2) (1863–2008)

	Miesiące / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{S}_r./\text{Av}$	0,6	0,6	1,3	6,1	28,5	42,0	51,5	41,1	11,5	2,1	0,4	0,3
\pm	0,2	0,2	0,3	0,7	2,0	2,4	2,6	2,4	1,3	0,5	0,1	0,1

Okres Period	Suma / Totals (mm)			σ (mm)	V (%)	γ_1
	$\bar{S}_r./\text{Av}$	Min.	Max.			
IV–IX	180,7 \pm 4,9	60,5	364,1	59,8	33	0,42
VI–VIII	134,6 \pm 4,2	28,7	290,1	50,9	37	0,42
X–III	5,2 \pm 0,7	0,0	42,7	8,5	163	2,36
I–XII	185,9 \pm 5,0	62,6	366,0	60,5	32	0,36

dem burzowym koreluje istotnie ze średnią temperaturą, ale współczynnik korelacji jest niewielki ($r = 0,23$), co oznacza, że zaledwie 5% zmienności tej charakterystyki może być objaśnione zmianami temperatury. Tak więc, wbrew pozorom, nie zachodzi prosta zależność opadów burzowych od temperatury powietrza. Pomimo że wraz ze wzrostem temperatury nasila się konwekcja, to jednak, jak pokazują wyniki badań (Twardosz, 2010), nie przekłada się to na większą częstość opadów burzowych i ich wydajność; tylko 2% wariancji sum opadów burzowych w Krakowie może być wyjaśnione zmiennością temperatury powietrza w lecie. Wynikać to może stąd, że w klimacie Polski najcieplejsze lata są zarazem najsuchsze i ta suchość nie sprzyja powstawaniu burz.



Rys. 7.1. Zależność liczby dni (góra) i sum opadów burzowych (dół) od średniej temperatury w półroczu ciepłym (IV–IX) i 95% przedział ufności linii regresji (1863–2008)

Fig. 7.1. Dependence of the number of thunderstorm precipitation days (top) and total (bottom) thunderstorm precipitation on average temperature in the warm half of the year (April–Sept) and the 95% confidence intervals for the regression lines (1863–2008)

Tabela 7.5. Udział opadów burzowych (%) w ogólnej sumie opadów i błąd standardowy średniej (1863–2008)

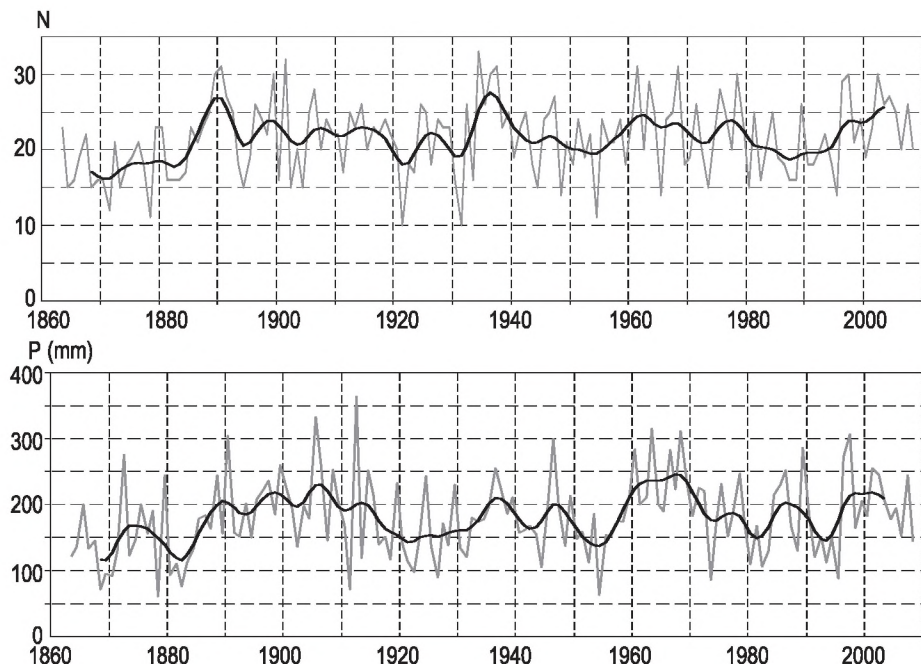
Table 7.5. Contribution (%) of thunderstorm precipitation to the overall precipitation total and its standard error (1863–2008)

Okres Period	Śr./ Av. (%)	Min. (%)	Max. (%)
I	1,8 ± 0,4	0,0	29,2
II	2,1 ± 0,4	0,0	31,3
III	3,7 ± 0,6	0,0	49,5
IV	13,1 ± 1,5	0,0	78,6
V	39,4 ± 1,9	0,0	99,5
VI	46,3 ± 1,9	0,5	98,2
VII	53,2 ± 1,8	0,0	94,4
VIII	47,4 ± 1,9	4,4	98,3
IX	19,3 ± 1,8	0,0	87,2
X	4,3 ± 1,2	0,0	100
XI	0,9 ± 0,4	0,0	40,4
XII	0,8 ± 0,2	0,0	18,3
IV–IX	40,1 ± 0,8	15,1	80,4
VI–VIII	49,1 ± 1,2	19,5	88,2
X–III	2,3 ± 0,3	0,0	15,7
I–XII	27,5 ± 0,6	22,4	95,4

Niemal 28% w sumie rocznej opadów stanowią opady burzowe. W półroczu letnim (IV–IX) stanowią one istotny składnik (40%) całej sumy opadów w tym okresie (tab. 7.5). Udział ten zmienia się jednak w szerokich granicach od 15 do 80%, a w lecie dochodzi prawie do 50%. W półroczu zimowym (X–III) sumy opadów w dniach z burzą stanowią zaledwie 2,3% sumy opadów z tego okresu. Natomiast w Stanach Zjednoczonych w dorzeczu Missisipi, gdzie liczba dni z burzą jest ponad dwukrotnie większa niż w Krakowie (30–60 dni), S.A. Changnon (2001) stwierdził, że opady burzowe stanowią aż 48% sumy rocznej opadu.

7.2. Zmienność wieloletnia liczby dni i sum opadów burzowych

W Krakowie w okresie 1863–2008 zaznaczyły się znaczne fluktuacje zarówno w przebiegu liczby dni, jak i sum opadów burzowych (rys. 7.2). W przebiegu wieloletnim liczby dni z opadem burzowym w półroczu letnim w ciągu 146 lat można wyróżnić 4 fazy osłabienia aktywności burzowej w latach: 1863–1884, 1919–1931, 1943–1959 i 1980–1995. Największa aktywność burzowa wystąpiła kolejno w la-



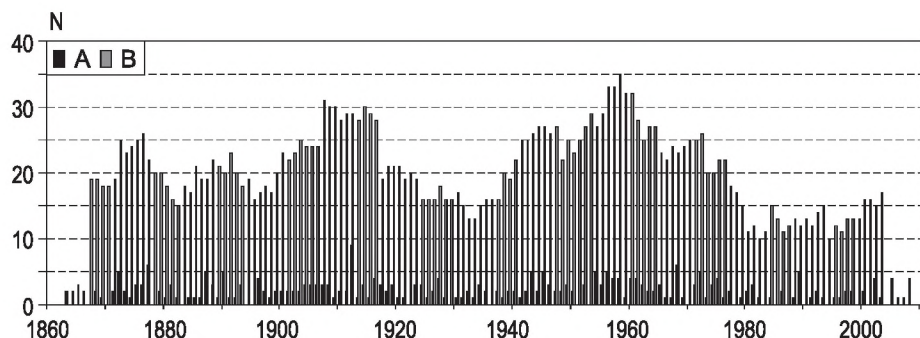
Rys. 7.2. Przebieg wieloletni liczby dni – N (górną) i sum opadów burzowych – P (dół) w półroczu ciepłym (IV–IX); wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1863–2008)

Fig. 7.2. Variation of the number of thunderstorm precipitation days – N (top) and totals – P (bottom) in the warm half of the year (April–Sept); values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1863–2008)

tach: 1885–1918, z kulminacją w roku 1890 (31 dni), 1932–1942 (33 dni w roku 1934), 1960–1979 (31 dni w roku 1961 i 1968) oraz współcześnie, w latach 1996–2008 (30 dni w latach 1997 i 2002). Wzrost liczby dni z burzą w tym ostatnim okresie można wiązać ze współczesnym ociepleniem klimatu (IPCC, 2007).

Fluktuacje sum opadów burzowych w półroczu ciepłym nie w pełni pokrywają się z fazami wyróżnionymi na podstawie liczby dni z opadem burzowym. Największe sumy tych opadów przypadły na lata 1960–1969 oraz 1997–2002. Wcześniej duże opady pochodzenia burzowego wystąpiły w okresie 1898–1914. Małe sumy opadów burzowych były przed rokiem 1885 oraz na początku lat 20., 50. i 90. XX wieku.

Największa częstość opadów gradu przypadła na lata 1942–1965, kiedy występowało przeciętnie 25–35 dni z gradem w dziesięciolecie. Często pojawiały się grady także w latach 1908–1917 (25–30 dni w dziesięciolecie). Pod koniec XIX wieku liczba dni z gradem kształtowała się na poziomie 15–25 dni w dziesięciolecie, a spadła do 15 dni w latach 1925–1937. Najwyraźniejsze i trudne do wytłumaczenia jest zmniejszenie się liczby dni z gradem do około 10–15 w dziesięciolecie po roku 1980, które na tym poziomie utrzymuje się do dziś (rys. 7.3). Zadecydowało to o ujemnym trendzie tego wskaźnika wynoszącym $-3,5$ dnia/10 lat (tab. 7.6).



Rys. 7.3. Przebieg wieloletni liczby dni (N) z opadem gradu w półroczu ciepłym (IV–IX); A – liczba dni z opadem gradu, B – liczba dni z opadem gradu w ruchomych dziesięcioleciach (1863–2008)

Fig. 7.3. Variation of the number of days (N) with hail in the warm half of the year (April–Sept); A – number of days with hail, B – number of days with hail in consecutive 10-year periods (1863–2008)

Tabela 7.6. Współczynniki trendu liczby dni z opadem burzowym opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008). W ostatnim wierszu (IV–IX h) podano wartości współczynników trendu dni z opadem gradu

Table 7.6. Coefficients of trend of the number of days with thunderstorm precipitation as described by linear regression on time (1863–2008). In the last line (IV–IX h) are trend coefficients for the number of days with hail precipitation

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (dni/100 lat) Regression coefficient (days/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
IV	0,001	$-0,1 \pm 0,3$	0,69	—
V	0,028	$+0,8 \pm 0,4$	0,044	*
VI	0,01	$+0,5 \pm 0,4$	0,22	—
VII	0,0004	$-0,1 \pm 0,5$	0,82	—
VIII	0,0094	$+0,5 \pm 0,4$	0,24	—
IX	0,028	$+0,5 \pm 0,2$	0,044	*
IV–IX	0,031	$+2,1 \pm 0,1$	0,034	*
VI–VIII	0,009	$+0,9 \pm 0,8$	0,25	—
X–III	0,15	$+1,1 \pm 0,2$	0,000001	***
I–XII	0,068	$+3,2 \pm 1,0$	0,001	**
IV–IX h	0,058	$-3,5 \pm 1,2$	0,005	**

¹ $\alpha > 0,05$ – —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ – *; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ – **; $\alpha < 0,001$ – ***

Najbardziej istotnym statystycznie trendem wzrostowym (+1,1 dnia/100 lat) odznacza się liczba dni z opadem burzowym w półroczu zimowym (tab. 7.6). Trend wartości rocznych wynosi +3,2 dnia/100 lat i jest istotny statystycznie na poziomie 0,01. Na nieco niższym poziomie istotny jest trend wzrostowy liczby dni z opadem

burzowym w półroczu ciepłym (+2,1 dnia/100 lat). Zastanawiający jest natomiast brak istotnego trendu wzrostowego w lecie i większości miesięcy półrocza letniego, z wyjątkiem maja i września. Zbliżone charakterystyki zmian wieloletnich liczby dni z burzą stwierdzono nie tylko w Krakowie, ale i w innych regionach Polski (Bielec-Bąkowska, 2001, 2002; Bielec-Bąkowska i Łupikasz, 2009). Z badań Bielec-Bąkowskiej wynika, że najwyraźniejsze tendencje wzrostowe liczby dni z burzą dotyczą burz zimowych w obszarze wybrzeża Bałtyku. Podobny nieregularny typ zmienności wieloletniej aktywności burzowej stwierdził S.A. Changnon (1985) w XX wieku na terytorium Stanów Zjednoczonych.

Nieco inaczej kształtują się trendy sum opadów burzowych (tab. 7.7). Trendy miesięczne są przeważnie wzrostowe, z wyjątkiem kwietnia i sierpnia, ale istotny statystycznie, i to tylko na poziomie 0,05, jest trend sum opadów burzowych w czerwcu (+13,4 mm/100 lat). Tendencja wzrostowa opadów burzowych w lecie nie jest istotna. Najbardziej istotnie, bo na poziomie 0,001, wzrastają sumy opadów burzowych w półroczu zimowym (+5,7 mm/100 lat), a z mniejszą istotnością także wartości roczne (+31,4 mm/100 lat) i półrocza letniego (+25,6 mm/100 lat). Także na krzywych kumulowanych odchyłach liczby dni i sum opadów burzowych półrocza letniego od średnich wieloletnich (rys. 7.4) widoczny jest wyraźny ich wzrost po roku 1960. Omawiane tendencje można wiązać ze współczesnym ociepleniem klimatu.

Istotna statystycznie tendencja wzrostowa zaznaczyła się także w udziale liczby dni z opadem burzowym w ogólnej liczbie dni z opadem oraz w udziale sum opadów burzowych w ogólnej sumie wszystkich opadów (tab. 7.8). W przypadku

Tabela 7.7. Współczynniki trendu sum opadów burzowych opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table. 7.7. Coefficients of trend for total thunderstorm precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (mm/100 lat) Regression coefficient (mm/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
IV	0,0008	-0,6 ± 1,7	0,74	
V	0,004	+3,4 ± 4,6	0,46	—
VI	0,04	+13,4 ± 5,5	0,016	*
VII	0,007	+3,9 ± 6,2	0,52	—
VIII	0,0000	-0,04 ± 5,7	0,99	—
IX	0,02	+5,4 ± 3,1	0,08	—
IV–X	0,032	+25,6 ± 11,6	0,029	*
VI–VIII	0,02	+17,3 ± 9,9	0,08	—
X–III	0,081	+5,7 ± 1,6	0,0005	***
I–XII	0,048	+31,4 ± 11,6	0,0076	**

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

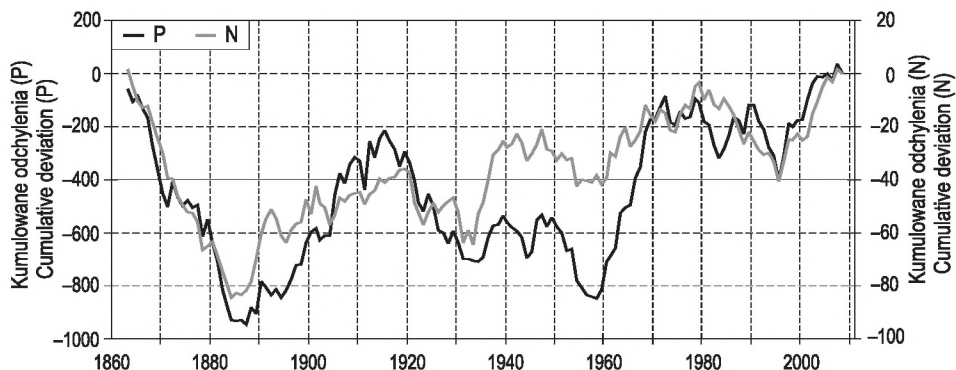
Tabela 7.8. Współczynniki trendu udziału liczby dni/sum opadów burzowych w ogólnej liczbie dni/sumach opadów opisanego za pomocą regresji liniowej względem czasu (1863–2008)

Table 7.8. Coefficients of trend for the contribution of the number of days with thunderstorm precipitation/total thunderstorm precipitation to overall number of days/total precipitation as described by linear regression on time (1863–2008)

Okres Period	R^2	Współczynnik regresji (%/100 lat) Regression coefficient (%/100 years)	p -wartość p -value	Istotność ¹ Significance ¹
Liczba dni z opadem / Number of days with precipitation				
IV	0,0005	$-0,5 \pm 2,0$	0,78	—
V	0,013	$4,2 \pm 3,1$	0,16	—
VI	0,023	$5,8 \pm 3,1$	0,06	—
VII	0,00005	$0,3 \pm 3,2$	0,93	—
VIII	0,042	$7,5 \pm 3,0$	0,012	*
IX	0,032	$5,2 \pm 2,3$	0,029	*
IV–IX	0,075	$+4,0 \pm 1,2$	0,0008	***
VI–VIII	0,040	$+4,7 \pm 1,9$	0,014	*
X–III	0,12	$+1,1 \pm 0,3$	0,00001	***
I–XII	0,056	$+1,7 \pm 0,6$	0,0038	**
Sumy opadów / Precipitation totals				
IV	0,003	$-2,5 \pm 3,5$	0,47	—
V	0,004	$3,3 \pm 4,4$	0,45	—
VI	0,07	$15,0 \pm 4,5$	0,0012	**
VII	0,032	$9,7 \pm 4,4$	0,028	*
VIII	0,019	$7,8 \pm 4,6$	0,093	—
IX	0,027	$8,4 \pm 4,2$	0,047	*
IV–IX	0,090	$+7,5 \pm 2,0$	0,0002	***
VI–VIII	0,095	$+10,7 \pm 2,7$	0,0001	***
X–III	0,076	$+2,3 \pm 0,7$	0,0007	***
I–XII	0,087	$+5,1 \pm 1,3$	0,0003	***

¹ $\alpha > 0,05$ —; $0,05 \geq \alpha > 0,01$ —*; $0,01 \geq \alpha \geq 0,001$ —**; $\alpha < 0,001$ —***

liczby dni z opadem burzowym najwyższe wartości trendu w odniesieniu do liczby dni z opadem zaznaczyły się w sierpniu ($+7,5\%/100$ lat), wrześniu ($+5,2\%/100$ lat) oraz w lecie ($+4,7\%/100$ lat). Największe zmiany w udziale sum opadów burzowych w sumie ogólnej stwierdzono w czerwcu ($+15,0\%/100$ lat) i w całym sezonie letnim ($+10,7\%/100$ lat). Także w sumie rocznej widoczna jest wzrastająca rola opadów burzowych w kształtowaniu jej wielkości, gdyż tendencja ich udziału w roku wynosi $+5,1\%/100$ lat.



Rys. 7.4. Kumulowane odchylenia liczby dni (N) i sum opadów (P) burzowych w półroczu ciepłym (IV–X) od średniej wieloletniej (1863–2008)

Fig. 7.4. Cumulative deviations of the number of thunderstorm precipitation days (N) and annual totals of thunderstorm precipitation (P) in the warm half of the year (April–Sept) from the multiannual average (1863–2008)

7.3. Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady burzowe

7.3.1. Związek opadów burzowych z typami cyrkulacji

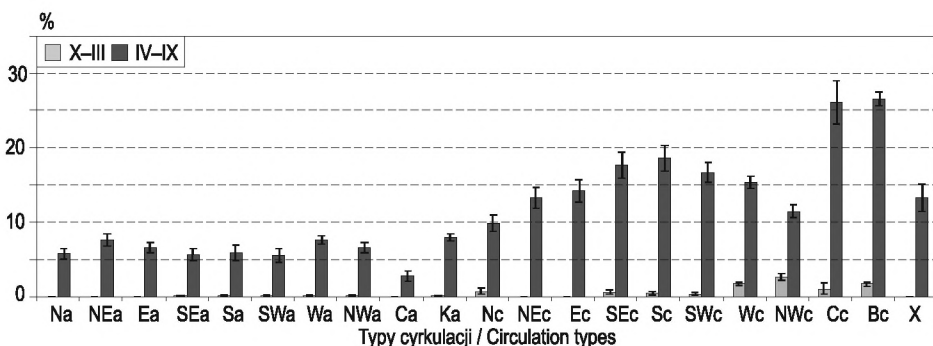
Opady burzowe są związane z silną konwekcją w atmosferze. Mogą więc pojawiać się zarówno w sytuacjach niżowych, zwłaszcza przy przechodzeniu frontów atmosferycznych, jak i w wyżach, gdzie w lecie często powstają burze wewnątrzmasowe w wyniku konwekcji termicznej. W lecie prawdopodobieństwo wystąpienia opadów burzowych w układach niżowych (tab. 7.9) jest ponad dwukrotnie większe niż w wyżowych i przekracza 24%, a średnia suma dobową opadu przekracza 10 mm. W półroczu letnim (IV–IX) prawdopodobieństwo wystąpienia burz dochodzi niemal do 18% przy sytuacjach niżowych, ale przy układach wyżowych wynosi 7%. Średnie sumy dobowe opadów są tylko nieznacznie niższe niż w lecie: 9,2 mm przy sytuacjach cyklonalnych i 6,6 mm przy antycyklonalnych. W półroczu zimowym opady burzowe zdarzają się rzadko (1,2%), i to niemal wyłącznie w układach niskiego ciśnienia. Prawdopodobieństwo wystąpienia opadów gradu w półroczu letnim wynosi 1,6% przy sytuacjach niżowych, a przy układach wysokiego ciśnienia osiąga 0,7%. Podobne wyniki uzyskano w dotychczasowych badaniach w Rosji (Kamyshanova, 1974), w Czechach (Brázdil, 1998), Stanach Zjednoczonych (Changnon, 1985) i w Polsce (Bielec-Bąkowska, 2002; Kolendowicz, 2005, 2007).

Wśród sytuacji niżowych największym prawdopodobieństwem wystąpienia opadów burzowych w półroczu letnim, przekraczającym 25%, odznacza się centrum niżu – Cc oraz bruzda cyklonalna Bc (rys. 7.5). Z dużym prawdopodobieństwem, przekraczającym 15%, burze mogą pojawiać się także przy adwekcji z sektora połu-

Tabela 7.9. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów burzowych i ich błędy standardowe w typach cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej (1874–2008); (*prawdopodobieństwo opadów gradu)

Table 7.9. Conditional probability and daily totals of thunderstorm precipitation and their standard error for cyclonic and anticyclonic circulation types (1874–2008); (*probability of hail)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
			Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	a	c	a		c	
IV–IX	6,8 ± 0,2	17,9 ± 0,4	6,6 ± 0,3	61,0	9,2 ± 0,2	99,0
IV–IX*	0,7 ± 0,1	1,6 ± 0,1	–	–	–	2
VI–VIII	10,0 ± 0,4	24,3 ± 0,7	7,1 ± 1,2	61,0	10,1 ± 1,1	82,6
X–III	0,08 ± 0,02	1,2 ± 0,1	6,7 ± 2,7	30,8	5,4 ± 0,4	24,8



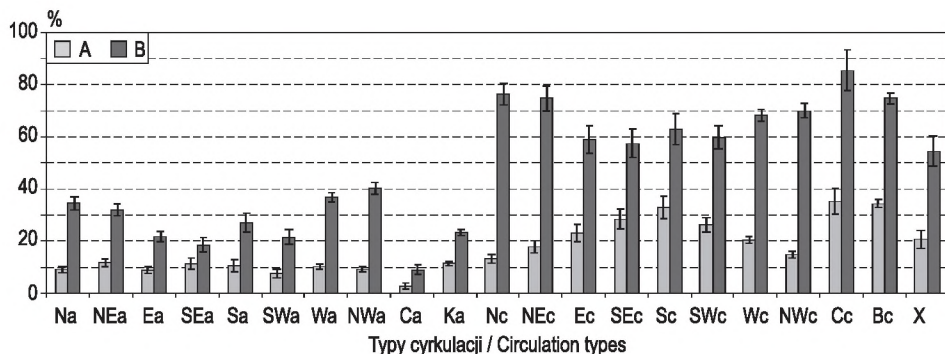
Rys. 7.5. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu burzowego i jego błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 7.5. Conditional probability (%) of thunderstorm precipitation by circulation type and its standard error (1874–2008)

dniowego oraz z zachodu (typy cyrkulacji: Sc, SEc, SWc i Wc). Natomiast w półroczu zimowym, kiedy burze pojawiają się rzadko, najbardziej sprzyjającymi sytuacjami do ich wystąpienia są typy cyrkulacji NWc i Wc.

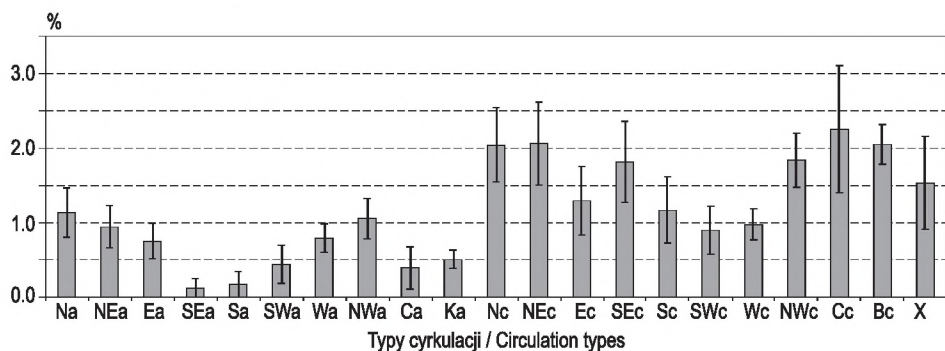
Interesujące jest porównanie prawdopodobieństwa wystąpienia opadu burzowego oraz wszystkich dni z opadem przy poszczególnych typach cyrkulacji w lecie (rys. 7.6); istotna różnica jest widoczna zwłaszcza przy sytuacjach adwekcyjnych. Największym prawdopodobieństwem wystąpienia opadów odznaczają się sytuacje cyklonalne z adwekcją z sektora północnego, opady burzowe natomiast zdarzają się najczęście przy adwekcji powietrza z sektora południowego.

Nieco inaczej rozkłada się prawdopodobieństwo warunkowe występowania opadów gradu w półroczu ciepłym (rys. 7.7). Na poziomie prawdopodobieństwa warunkowego około 2% grady zdarzają się przy 6 typach cyrkulacji. Są to zarówno



Rys. 7.6. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu burzowego (A) i prawdopodobieństwo warunkowe wszystkich opadów w lecie (B) i jego błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 7.6. Conditional probability (%) of thunderstorm precipitation (A) and conditional probability of all precipitation (B) in summer by circulation type and their standard errors (1874–2008)

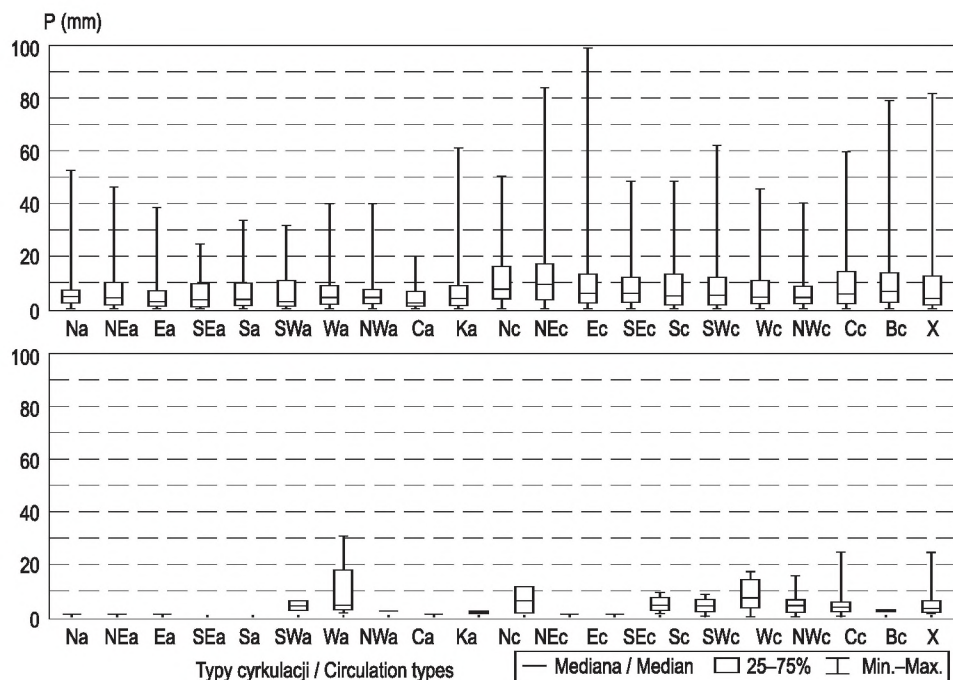


Rys. 7.7. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu gradu w półroczu ciepłym (IV–IX) i jego błąd standardowy w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 7.7. Conditional probability (%) of hail precipitation in the warm half of the year (April–Sept) by circulation type and its standard error (1874–2008)

sytuacje bezadwekcyjne Cc i Bc, jak i cyklonalne sytuacje adwekcyjne z sektora północnego Nc, NEc i NWc, a także typ SEc.

Największe sumy dobowe opadów burzowych (rys. 7.8) w półroczu ciepłym są związane głównie z typami cyrkulacji NEc i Nc. Natomiast z prawdopodobieństwem 25% opady burzowe mogą przekraczać 15 mm przy niemal wszystkich sytuacjach cyklonalnych, z wyjątkiem typu NWc, oraz przy jednej sytuacji wyżowej SWa, kiedy mogą tworzyć się głównie burze konwekcji termicznej. Najwyższy do tej pory zanotowany opad dobowy w Krakowie, wynoszący 99 mm, wystąpił w czasie lokalnej burzy gradowej 9 września 1963 roku przy sytuacji Ec, w masie powietrza polarnego morskiego starego i przy obecności rozmytych frontów atmosferycznych w Polsce Południowej.



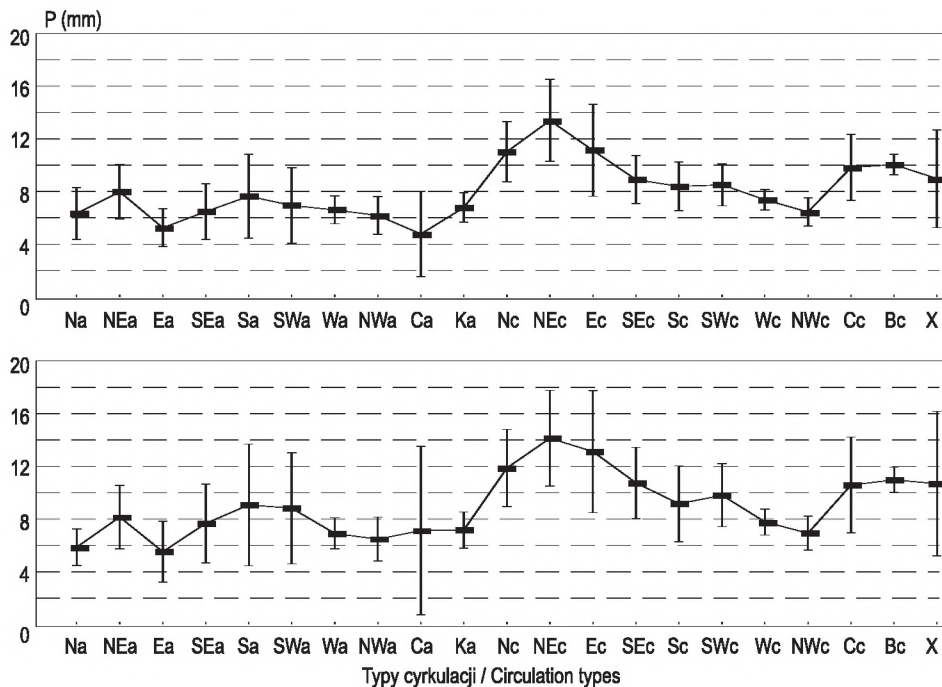
Rys. 7.8. Charakterystyki statystyczne sum dobowych opadów burzowych w typach cyrkulacji w półroczu ciepłym (góra) i półroczu chłodnym (dół) (1874–2008)

Fig. 7.8. Statistical characteristics of daily thunderstorm precipitation totals by circulation type in the warm half (top) and cold half (bottom) of the year (1874–2008)

Charakterystyki średnich dobowych sum opadu burzowego przy poszczególnych typach cyrkulacji wraz z 95% przedziałem ufności w półroczu ciepłym i w lecie przedstawiono na rysunku 7.9. Najwyższe średnie opady burzowe, przekraczające 12 mm, w półroczu letnim zdarzyły się tylko przy sytuacji NEc. W lecie zdarzają się jeszcze przy typach cyrkulacji Ec i Nc. Przy sytuacjach cyklonalnych najniższymi sumami opadów burzowych w lecie odznacza się typ cyrkulacji NWc (około 5 mm). W granicach od 6 do 9 mm kształtują się opady burzowe przy wyżowych typach cyrkulacji. Największą zmiennością tych opadów odznacza się natomiast centrum wyżu (Ca).

7.3.2. Związek opadów burzowych z masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi

Możliwość wystąpienia burz jest większa przy przechodzeniu frontów atmosferycznych niż w jednorodnych masach powietrznych (tab. 7.10). W lecie prawdopodobieństwo wystąpienia burz przy przechodzeniu frontów sięga 25,4%, podczas gdy



Rys. 7.9. Średnie dobowe sumy opadów i ich 95% przedział ufności w półroczu ciepłym (góra) i lecie (dół) w typach cyrkulacji (1874–2008)

Fig. 7.9. Average daily totals of thunderstorm precipitation in the warm half of the year (top) and summer (bottom) by circulation type and their 95% confidence intervals (1874–2008)

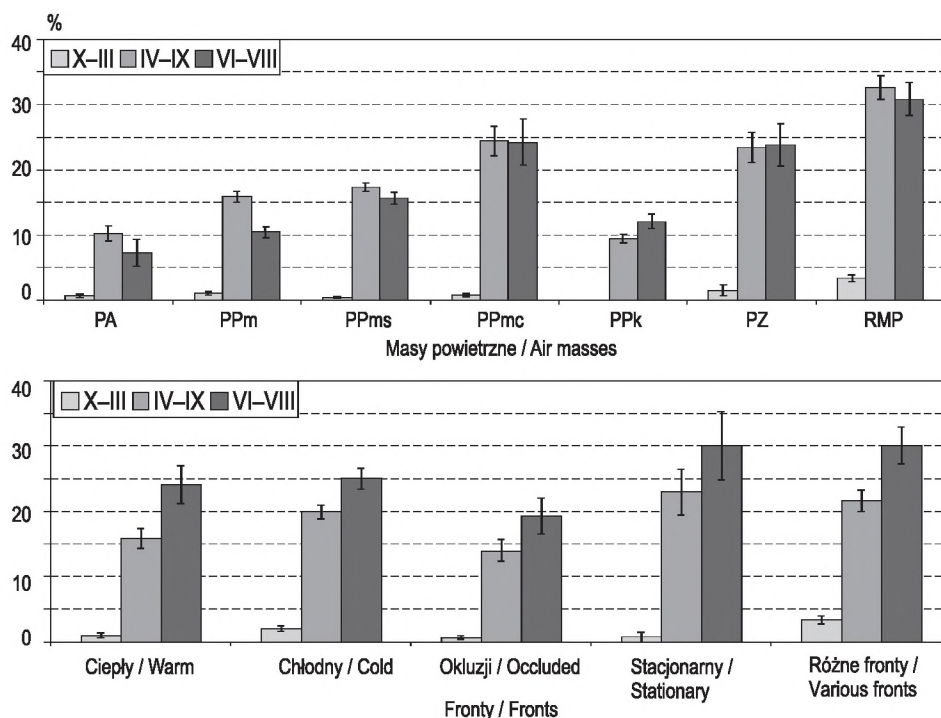
przy braku frontów wynosi 10,7%. Podobne relacje dotyczą także półrocza letniego. W półroczu zimowym natomiast burze zdarzają się niemal wyłącznie na frontach atmosferycznych, z prawdopodobieństwem 1,8%. Także średnie dobowe sumy opadów są wyższe przy burzach frontowych (w lecie 10,6 mm) niż wewnątrzmasowych (w lecie 7,9 mm). Na rolę frontów atmosferycznych w kształtowaniu opadów burzowych zwrócili uwagę także inni autorzy (Kamyshanova, 1974; Brázdil, 1998, Changnon, 1985; Bielec-Bąkowska, 2002 i Kolendowicz, 2005, 2007).

Dzięki istniejącemu kalendarzowi mas powietrznych i frontów atmosferycznych z lat 1951–2008 można dokładnie przedstawić charakterystyki probabilistyczne opadów burzowych w zależności od wymienionych charakterystyk synoptycznych (rys. 7.10). Zarówno w lecie, jak i w półroczu letnim opady burzowe zdarzają się najczęściej (prawdopodobieństwo ponad 30%) w dniach, w których następuje zmiana mas powietrznych, oraz w ciepłych masach – w powietrzu polarnym morskim ciepłym (25%) i zwrotnikowym (24%). Najmniejsza możliwość wystąpienia opadów burzowych zaznacza się w powietrzu arktycznym i polarnym kontynentalnym. Opady burzowe zdarzają się przy przechodzeniu wszystkich frontów atmosferycznych,

Tabela 7.10. Prawdopodobieństwo warunkowe i sumy dobowe opadów burzowych wewnątrzmasowych i frontowych oraz ich błędy standardowe; (*prawdopodobieństwo opadów gradu) (1951–2008)

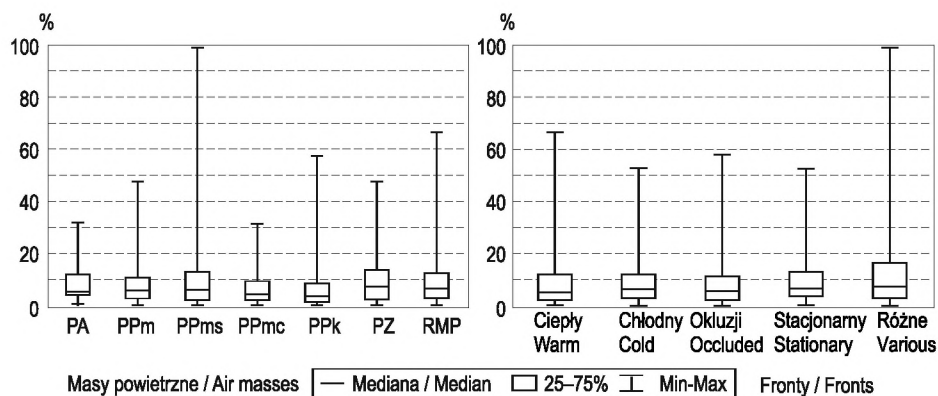
Table 7.10. Conditional probability and daily totals of air mass and frontal thunderstorm precipitation and their standard error (*probability of hail) (1951–2008)

Okres Period	Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)		Suma dobowa / Daily totals (mm)			
	Opady / Precipitation		Śr./ Av.	Max.	Śr./ Av.	Max.
	wewnątrzmasowe air-mass	frontowe frontal	wewnątrzmasowe air-mass		frontowe frontal	
IV–IX	$7,6 \pm 0,3$	$18,9 \pm 0,7$	$7,1 \pm 0,4$	79,0	$9,6 \pm 0,4$	99,0
IV–IX*	$0,8 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,2$	–	–	–	–
VI–VIII	$10,7 \pm 0,6$	$25,4 \pm 1,1$	$7,9 \pm 0,5$	79,0	$10,6 \pm 0,5$	66,5
X–III	$0,13 \pm 0,04$	$1,8 \pm 0,2$	$3,8 \pm 1,8$	15,6	$5,6 \pm 0,5$	22,1



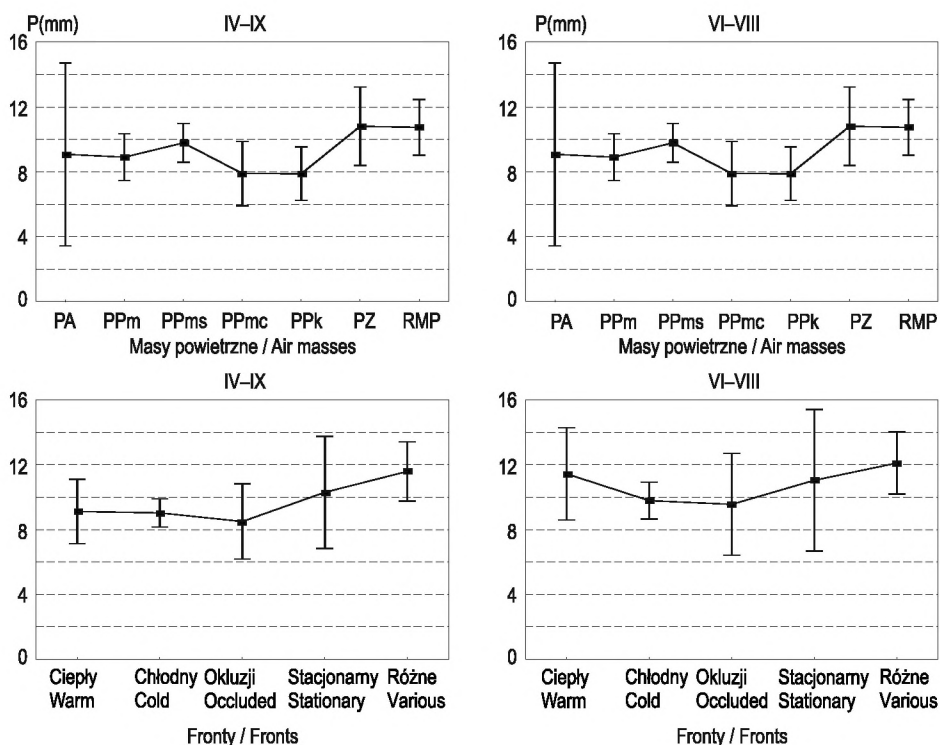
Rys. 7.10. Prawdopodobieństwo warunkowe (%) opadu burzowego i jego błąd standardowy w masach powietrznych (góra) i na frontach atmosferycznych (dół) (1951–2008)

Fig. 7.10. Conditional probability (%) of thunderstorm precipitation by air mass (top) and type of front (bottom) and its standard error (1951–2008)



Rys. 7.11. Charakterystyki statystyczne sum dobowych opadów burzowych w półroczu ciepłym (IV–IX) w masach powietrznych (lewy) i na frontach atmosferycznych (prawy), 1951–2008

Fig. 7.11. Statistical characteristics of daily thunderstorm precipitation totals in the warm half of the year (April–Sept) by air mass (left) and by type of front (right), 1951–2008



Rys. 7.12. Średnie dobowe sumy opadów burzowych i ich 95% przedział ufności w masach powietrznych (góra) i frontach atmosferycznych (dół) w półroczu ciepłym (IV–IX) i lecie (VI–VIII) (1951–2008)

Fig. 7.12. Average daily totals of thunderstorm precipitation and their 95% confidence intervals by air mass (top) and type of front (bottom) in the warm half of the year (IV–IX) and in summer (VI–VIII) (1951–2008)

jednak prawdopodobieństwo ich wystąpienia dochodzi w lecie do 30% przy frontach stacjonarnych oraz przy przechodzeniu kilku różnych frontów w ciągu doby. Nieco mniejszym prawdopodobieństwem (około 25%) wystąpienia opadów burzowych odznaczają się fronty chłodne i ciepłe.

Sumy dobowe opadów burzowych w półroczu ciepłym (rys. 7.11) mogą przekroczyć 10 mm z prawdopodobieństwem 25% w powietrzu zwrotnikowym, polarnym morskim starym oraz przy zmianie mas powietrza w ciągu doby. Takie sytuacje zdarzają się też przy przechodzeniu frontów atmosferycznych, ale przy przechodzeniu kilku różnych frontów opady burzowe przekraczają już 15 mm.

Podobnie kształtuje się wpływ mas powietrznych na średnie dobowe sumy opadów burzowych (rys. 7.12). Zarówno w lecie, jak i w półroczu letnim ich średnie sumy w powietrzu zwrotnikowym i w dniach z różnymi masami powietrznymi osiągają 8,7 mm. Najmniejsze opady burzowe (średnio 8,0 mm) stwierdzono w masach powietrza polarnego kontynentalnego i polarnego morskiego ciepłego. W lecie średnie sumy opadów burzowych przekraczają 10 mm tylko na froncie stacjonarnym oraz w przypadku przechodzenia kilku frontów w ciągu doby, a także przy froncie ciepłym. W półroczu ciepłym średnie opady burzowe zarówno przy froncie chłodnym, jak i ciepłym kształtują się na podobnym poziomie – około 9 mm.

8. OPADY MARZNAĆE

Spośród innych typów opadów dużą wagę przywiązuje się do opadów marznięcych, jako jednego z niebezpiecznych zjawisk meteorologicznych dla gospodarki, a zwłaszcza dla komunikacji. Bardzo dobre opracowania w tym zakresie zostały wykonane w odniesieniu do obszaru Rosji (Bezrukova i in., 2006) oraz Stanów Zjednoczonych (Houston i Changnon, 2007). W Polsce opadom tym poświęcano nieco mniej uwagi, chociaż i w naszym kraju opady marznięce doprowadzają do zagrożeń w komunikacji. W styczniu 2010 roku wyjątkowo silne opady marznięce na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej doprowadziły do znacznego obciążenia gołoledzią, a później sadzią drzew i przewodów energetycznych, co spowodowało katastrofalne zniszczenia drzewostanów w lasach oraz przerwanie linii energetycznych, pozbawiając wiele miejscowości na kilka tygodni dostępu do energii elektrycznej.

Celowe więc jest prześledzenie tej charakterystyki w przypadku Krakowa. Opady marznięce występują w półroczu chłodnym w sytuacjach, kiedy przy ujemnej temperaturze przy powierzchni gruntu w wyższych warstwach atmosfery napływa cieplejsze powietrze, o temperaturze dodatniej, i występują opady mżawki lub deszczu marznięcego. Do tej grupy zjawisk zaliczono także opady deszczu lodowego. Przy analizie danych okazało się, że regularne i wiarygodne obserwacje opadów marznięcych rozpoczęto dopiero w roku 1920. Dlatego też ta charakterystyka opadów została opracowana w latach 1920–2008.

W okresie rozpatrywanych 89 lat w Krakowie zanotowano 345 dni z opadami marznięcymi (tab. 8.1), co daje średnio 4 dni z opadem marznięcym w roku. W półroczu chłodnym (X–III) wystąpiło aż 337 dni z takimi opadami, a tylko 8 dni zdarzyło się poza tym okresem: 4 dni w kwietniu oraz po 2 dni w maju i wrześniu. W półroczu chłodnym najczęściej opady marznięce zdarzały się w grudniu, w 114 dniach (34%), oraz w styczniu (84 dni) i w lutym (69 dni).

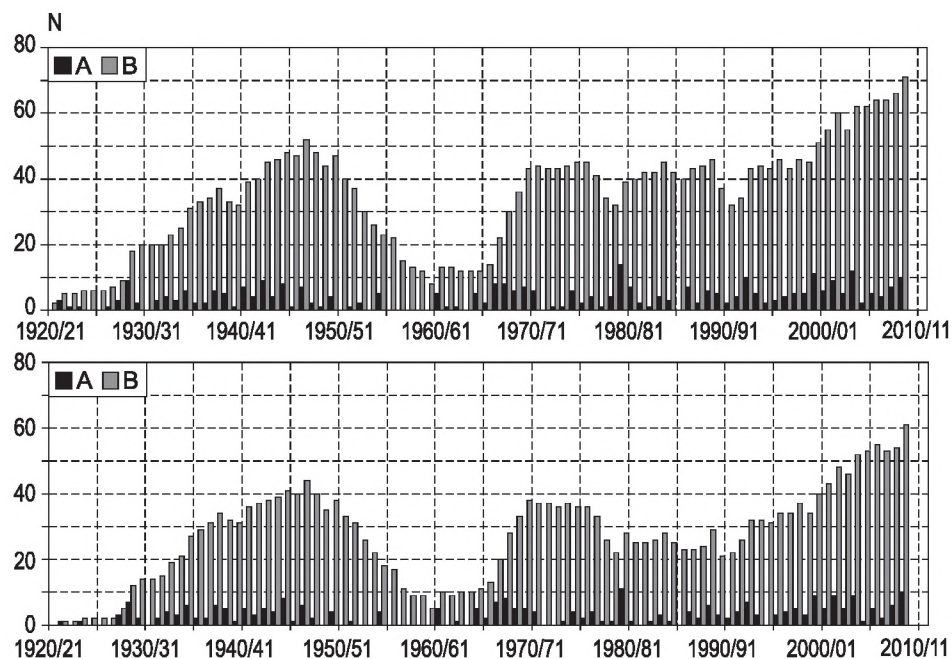
W przebiegu wieloletnim (rys. 8.1) zaznaczyły się fluktuacje, a po roku 1990 znaczący trend wzrostowy i w ostatnim badanym dziesięcioleciu 1999–2008 liczba dni z opadem marznięcym przekroczyła 70. Liczba dni z opadem marznięcym przekraczała 40 dni w dziesięcioleciu 1941–1950 i po roku 1990. Minimum przypadło na lata 1951–1967 (10–20 dni w dziesięcioleciu). W latach 1968–1990 liczba dni z opadem marznięcym utrzymywała się w pobliżu średniej wieloletniej, wynoszącej 38 dni na 10 lat. Zmiany te wynikają głównie z fluktuacji ich częstości zachodzących w okresie zimowym.

W półroczu chłodnym prawdopodobieństwo wystąpienia dnia z opadem marznięcym wynosi 2,1%. Biorąc pod uwagę 21 typów cyrkulacji, najbardziej prawdopodob-

Tabela 8.1. Liczba dni z opadem marznącym – Ld; w ostatnim wierszu podano wartości względne (%) (1920–2008)

Table 8.1. Number of days with freezing precipitation – Ld; relative values are given in the last row (1920–2008)

	Miesiące / Months												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
Ld	85	69	26	4	2	–	–	–	2	10	38	121	357
%	23,8	19,3	7,3	1,1	0,6	–	–	–	0,6	2,8	10,6	33,9	100



Rys. 8.1. Przebieg wieloletni liczby dni z opadem marznącym (N) w półroczu chłodnym (X–III), (górze) i w zimie (dół); A – liczba dni z opadem marznącym, B – liczba dni z opadem marznącym w dziesięcioleciu (1920–2008)

Fig. 8.1. Variation of the number of days with freezing precipitation (N) in the cold half of the year (Oct–March) (top) and in winter (bottom); A – number of days with freezing precipitation, B – number of days with freezing precipitation in consecutive 10-year periods (1920–2008)

ne (8,3%) jest pojawienie się opadu marznącego przy sytuacji południowo-wschodniej cyklonalnej – SEc (tab. 8.2). Wyższe od przeciętnego jest prawdopodobieństwo przy dalszych 6 typach cyklonalnych: Ec, Cc, Bc, NEc, Sc i SWc oraz przy 2 typach antycyklonalnych: Na i NEa.

Tabela 8.2. Sumy i prawdopodobieństwo warunkowe opadów marznięcych oraz ich błędy standardowe w półroczu chłodnym (X–III) (1920–2008)

Table 8.2. Totals and conditional probability of freezing precipitation and their standard errors in the cold half year (Oct–March) (1920–2008)

Typ cyrkulacji Circulation type		Suma dobowa / Daily totals (mm)		Prawdopodobieństwo (%) Probability (%)
		Śr. / Av.	Max.	
1	Na	0,4 ± 0,2	2,0	3,4 ± 0,9
2	NEa	2,2 ± 0,7	7,0	2,3 ± 0,9
3	Ea	0,6 ± 0,3	3,5	1,8 ± 0,4
4	SEa	1,3 ± 0,9	11,8	2,1 ± 0,5
5	Sa	1,3 ± 0,6	6,0	1,3 ± 0,4
6	SWa	1,3 ± 0,6	7,4	1,7 ± 0,4
7	Wa	0,8 ± 0,4	8,8	1,9 ± 0,3
8	NWa	1,1 ± 0,4	4,5	1,8 ± 0,5
9	Ca	0,6 ± 0,2	1,4	1,1 ± 0,5
10	Ka	0,5 ± 0,3	4,6	1,1 ± 0,3
11	Nc	0,7 ± 0,2	1,7	1,6 ± 0,7
12	NEc	0,7 ± 0,3	2,1	2,2 ± 1,0
13	Ec	3,1 ± 1,1	13,2	3,6 ± 1,0
14	Sec	2,7 ± 0,9	12,3	8,3 ± 1,4
15	Sc	1,5 ± 0,5	6,5	2,5 ± 0,6
16	SWc	2,5 ± 0,9	12,4	2,9 ± 0,5
17	Wc	2,6 ± 0,8	11,2	1,7 ± 0,3
18	NWc	3,6 ± 1,0	11,3	2,1 ± 0,5
19	Cc	11,8 ± 3,6	29,5	2,9 ± 1,4
20	Bc	3,2 ± 1,3	22,4	2,6 ± 0,5
21	X	2,1 ± 0,7	4,9	1,0 ± 0,6
1–1	Total	2,0 ± 0,9	29,5	2,1 ± 0,1
1–10	a	1,0 ± 1,0	11,8	1,7 ± 0,1
11–20	c	3,2 ± 3,2	29,5	2,7 ± 0,2

Opady marznięce z największym prawdopodobieństwem zdarzały się w dniach z wystąpieniem frontu stacjonarnego (2,5%) i frontu ciepłego (2,2%). W dniach bez-frontowych prawdopodobieństwo wynosi tylko 0,9%.

9. ZMIENNOŚĆ LICZBY DNI Z OPADEM W LATACH 1812–1855

9.1. Przebieg roczny

Pierwsza połowa XIX wieku jest okresem bardzo ważnym z punktu widzenia badania ewolucji klimatu, bowiem według niektórych klimatologów w połowie XIX stulecia zakończył się okres małej epoki lodowej (Obrębska-Starkłowa, 1997). W dotychczasowych opracowaniach klimatu tego okresu w Krakowie koncentrowano się głównie na charakterystyce warunków termicznych, np. w badaniach J. Trepińskiej (1988) oraz J. Trepińskiej i L. Kowanetza (1997). Rozpatrywano także opady atmosferyczne (np. Twardosz, 2007a), ale tylko ich częstość i sumy, bez uwzględniania postaci i typów.

Na podstawie zgromadzonej bazy danych z obserwacji jakościowych opadów dokonano charakterystyki postaci i typu opadów atmosferycznych zgodnie z klasyfikacją T. Niedźwiedzia, zamieszczoną w tabeli 1.1, w okresie od grudnia 1812 do końca 1855 roku; z luką w danych z lat 1845–1848. Z lat 1792–1811 zachowały się fragmentaryczne materiały; pełne dane są dostępne tylko z roku 1793. Od 1856 do 1862 roku (do listopada) nie zachowały się żadne materiały z obserwacji codziennych. Od roku 1812 dostępna jest cała seria bez żadnych przerw dotycząca tylko ogólnej liczby dni z opadem, gdyż takie zestawienia zachowały się w komplecie.

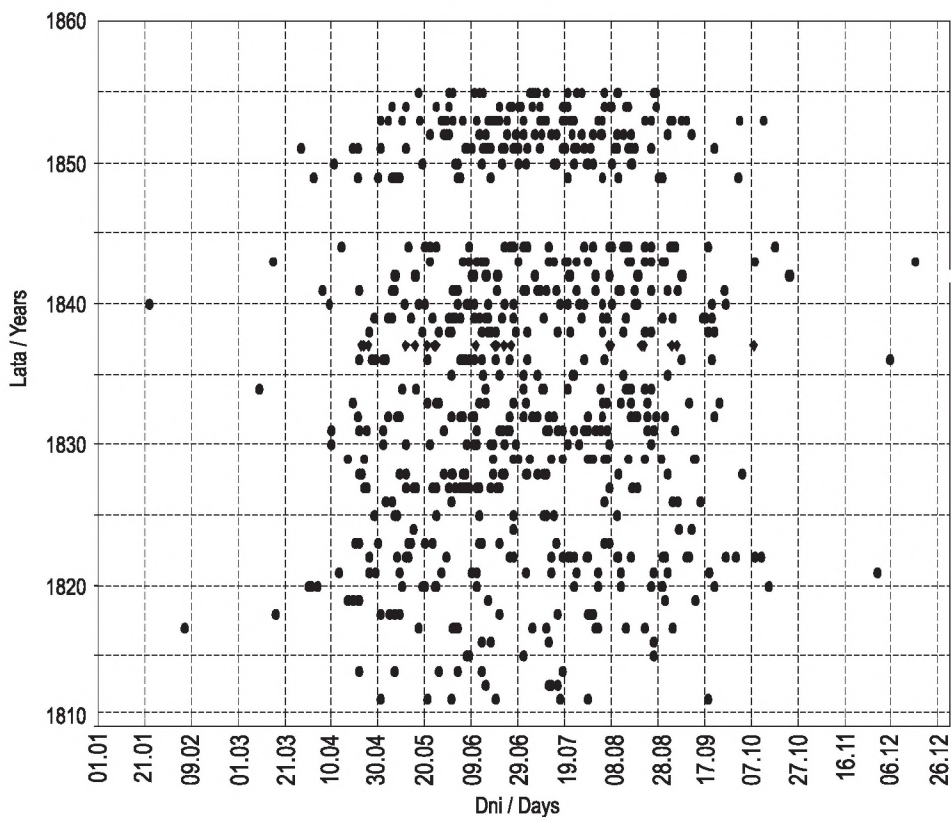
Podstawowe charakterystyki statystyczne liczby dni z opadem zestawiono w tabeli 9.1. W przebiegu rocznym dni opadowych w latach 1812–1855 występują wyraźne różnice w porównaniu z okresem 1863–2008 (tab. 2.1). We wcześniejszym wieloleciu stwierdza się przede wszystkim większą zmienność liczby dni z opadem w roku, porach roku i miesiącach, z wyjątkiem marca. Większa zmienność zaznacza się także w wartościach średnich i skrajnych. Przeciętnie w roku opady występowały rzadziej, co było wynikiem mniejszej częstości opadów w jesieni i zimie. Wyraźnie częściej natomiast opady występowały w okresie wiosny i lata. W latach 1812–1855 maksimum w przebiegu rocznym liczby dni z opadem wystąpiło w lipcu – 16 dni. Najbardziej deszczowym miesiącem był lipiec 1844 roku – 30 dni z opadem (tab. 9.1). Jak wynika z zapisów w dziennikach obserwacyjnych, był to wyjątkowo mokry miesiąc, gdyż w większości dni opady były notowane w 3 terminach obserwacji meteorologicznych. Opady te często towarzyszyły burzom. Lipiec 1844 roku był wyjątkowo chłodny, średnia temperatura miesięczna wyniosła wtedy zaledwie 15,3°C i była wyższa tylko o 0,2°C od najchłodniejszego lipca (1831), jaki wystąpił w Krakowie.

Tabela 9.1. Liczba dni z opadem $\geq 0,1$ mm, błąd standardowy średniej i charakterystyki statystyczne: σ – odchylenie standardowe, V – współczynnik zmienności (1812–1855)

Table 9.1. Number of days with precipitation $\geq 0,1$ mm, standard error of the mean and statistical characteristics: σ – standard deviation, V – variability coefficient (1812–1855)

Okres Period	Dni z opadem / Days with precipitation			σ (mm)	V (%)
	Śr. / Av.	Min.	Max.		
I	13,5 \pm 0,6	5	24	4,5	33
II	12,4 \pm 0,7	4	24	5,0	40
III	14,4 \pm 0,6	5	25	4,5	30
IV	14,3 \pm 0,5	7	23	3,9	27
V	15,9 \pm 0,6	9	25	4,1	25
VI	15,8 \pm 0,6	7	26	4,5	28
VII	16,0 \pm 0,7	7	30	5,2	32
VIII	14,8 \pm 0,6	4	27	4,5	30
IX	12,4 \pm 0,7	3	24	4,8	38
X	12,7 \pm 0,7	3	21	4,9	39
XI	114,0 \pm 0,6	3	21	4,3	30
XII	14,3 \pm 0,6	6	26	4,3	30
III–V	44,6 \pm 1,2	30	63	8,4	18
VI–VIII	46,7 \pm 1,6	27	69	11,0	23
IX–XI	39,1 \pm 1,4	19	61	10,0	25
XII–II	40,1 \pm 1,4	19	63	10,3	25
I–XII	170,5 \pm 4,4	111	239	31,1	18

Średnie liczby dni z opadem z rozróżnieniem na postać i typ opadów przedstawiono w tabeli 9.2. W zestawieniu nie uwzględniono dni z opadem poziomym, gdyż w świetle zachowanych materiałów obserwacyjnych nie było możliwości ich rozróżnienia. W latach 1812–1855 w przebiegu rocznym opadów stwierdza się wyraźnie większą częstość dni z opadem śnieżnym (kody 3 i 7), zarówno w zimie, jak i porach przejściowych, w porównaniu do okresu 1863–2008 (tab. 2.2). Na przykład średnia roczna liczba dni z opadem śniegu wyniosła w tych latach odpowiednio 37,1 (tab. 9.2) i 29,6 (tab. 2.2). Jak pokazują badania J. Trepińskiej (1988), w pierwszej połowie XIX wieku często występowały surowe zimy, a więc warunki korzystne dla pojawiania się opadów śniegu. Takie sytuacje pogodowe nie były sprzyjające dla występowania opadów mieszanych i ciekłych, zwłaszcza w zimie. W tej porze roku średnia liczba dni z opadem ciekłym wyniosła 11,7 i była o 2,3 dnia mniejsza niż w okresie 1863–2008. Na uwagę zasługuje stosunkowo mała liczba dni z opadem burzowym w okresie obserwacji przedinstrumentalnych. Średnia liczba dni z takim opadem wyniosła tylko 14,9 dnia, była więc znacząco mniejsza od średniej liczby w latach 1863–2008. Wartości te mogą więc budzić pewne wątpliwości, gdyż odnośnie do sposobu obserwacji zjawisk



Rys. 9.1. Występowanie dni z opadem burzowym (1812–1855)

Fig. 9.1. Occurrence of days with thunderstorm precipitation (1812–1855)

burzowych w początkowym okresie nie mamy informacji. Na przykład w lecie 1824 i 1826 roku wystąpiły tylko pojedyncze dni z opadem burzowym (tab. 9.3). Choć patrząc na przebieg roczny występowania opadów burzowych, można zauważyć, że wyraźnie zmniejszona ich częstość była tylko w pierwszym dziesięcioleciu XIX wieku (rys. 9.1). W okresie 1812–1855 opady burzowe zdarzały się także w miesiącach zimowych. Wystąpiły one w dniach: 7 lutego 1817, 30 listopada 1821, 5 grudnia 1836, 23 stycznia 1840 i 16 grudnia 1843 roku.

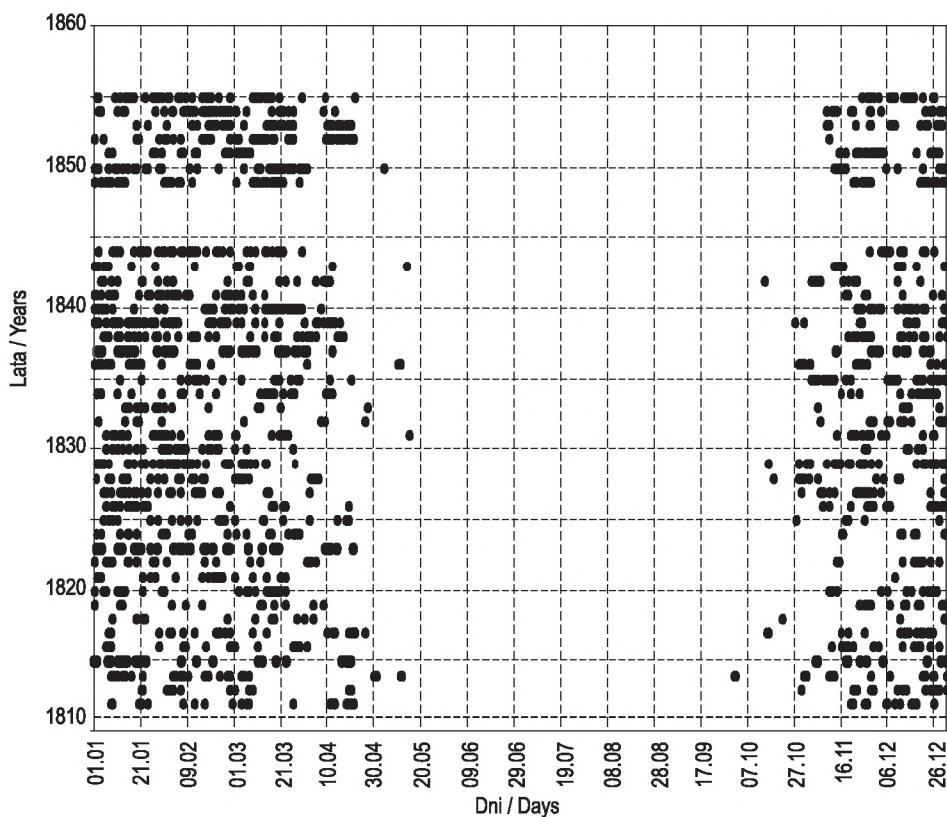
Przebieg roczny opadów śniegu w latach 1812–1855 przedstawiono na rysunku 9.2. Również w tym okresie zaznaczyła się duża zmienność dat początku i końca występowania opadów śniegu. Najwcześniej opad śniegu wystąpił 1 października 1814 roku; trwał 2 dni. W innych latach zdarzały się także bardzo wczesne opady śniegu, bo już w drugiej dekadzie października. Ostatni dzień z opadem śniegu zdarzył się 15 maja 1830 roku. Późno wystąpił opad śniegu także w roku 1843 – 14 maja. Potencjalny okres występowania opadów śniegu w okresie 1812–1855 wyniósł zatem 226 dni.

Tabela 9.2. Średnia liczba dni z różnymi postaciami i typami opadów oraz dni z burzą i ich błędy standardowe (1812–1855)

Table 9.2. Average number of days with different precipitation types and days with a thunderstorm and their standard error (1812–1885)

Kod Code	Miesiące / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	3,3	3,3	5,1	8,9	11,7	11,3	12,2	11,3	10,6	11,1	8,0	5,0
±	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6
2	1,5	1,4	2,1	1,3	0,2	–	–	–	–	0,4	1,3	1,8
±	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	–	–	–	–	0,1	0,2	0,3
3	8,7	7,0	6,7	2,6	0,20	–	–	–	–	0,53	5,0	6,9
±	0,7	0,7	0,7	0,4	0,10	–	–	–	–	0,16	0,5	0,5
5	–	–	–	0,28	0,38	0,33	0,10	0,10	0,23	0,08	–	–
±	–	–	–	0,111	0,11	0,12	0,05	0,05	0,08	0,04	–	–
6	–	–	–	0,30	0,93	0,40	0,50	0,63	0,38	0,08	–	–
±	–	–	–	0,10	0,18	0,11	0,12	0,16	0,12	0,04	–	–
7	0,03	–	0,03	0,03	–	–	–	–	–	–	–	–
±	0,03	–	0,03	0,03	–	–	–	–	–	–	–	–
8	–	–	0,08	0,93	2,5	3,7	3,2	3,1	1,2	0,3	–	0,05
±	–	–	0,04	0,18	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	–	0,03
9	–	–	–	0,18	0,30	0,35	0,35	0,23	0,10	–	–	–
±	–	–	–	0,07	0,08	0,10	0,08	0,08	0,05	–	–	–

Kod Code	Okres / Period				
	III–V	VI–VIII	IX–XI	XII–II	I–XII
1	25,7	34,8	29,7	11,7	101,2
±	0,9	1,3	1,6	0,9	3,2
2	3,5	–	1,6	4,4	9,6
±	0,4	–	0,2	0,4	0,8
3	9,4	–	5,5	22,2	37,1
±	0,8	–	0,6	1,3	1,8
5	0,98	0,53	0,38	–	2,1
±	0,23	0,12	0,09	–	0,3
6	1,2	1,5	0,48	0,03	3,3
±	0,2	0,3	0,13	0,03	0,4
7	0,05	–	–	0,03	0,08
±	0,03	–	–	0,03	0,04
8	3,5	10,0	1,4	0,05	14,9
±	0,3	0,9	0,3	0,04	1,2
9	0,50	0,89	0,15	–	1,6
±	0,13	0,17	0,07	–	0,2



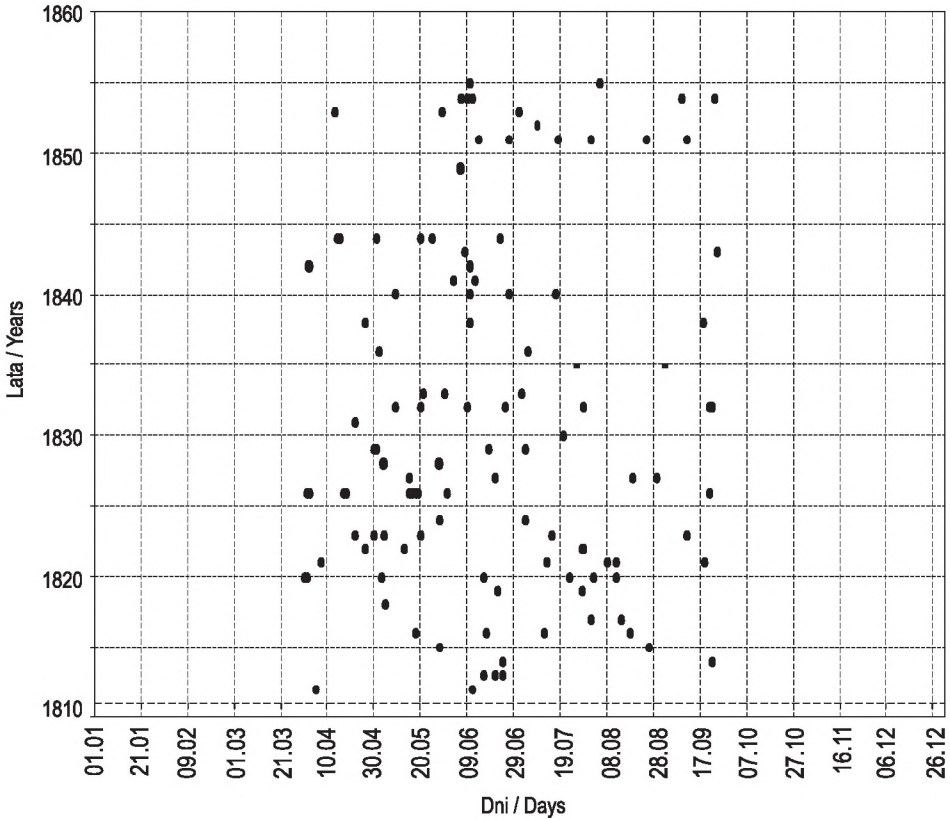
Rys. 9.2. Występowanie dni z opadem śniegu (1812–1855)

Fig. 9.2. Occurrence of days with snowfall (1812–1855)

Przebieg roczny opadów gradów zobrazowano na rysunku 9.3. Widać silną koncentrację tych opadów od maja do czerwca.

9.2. Przebieg wieloletni

Przebieg wieloletni liczby dni z opadem w różnej postaci i różnego typu przedstawiono w roku (rys. 9.4) oraz w porze letniej (rys. 9.5) i zimowej (rys. 9.6) w całym okresie 1812–2008. Potwierdza się bardzo duża zmienność z roku na rok częstości opadów na początku XIX wieku. Ponadto zaznaczają się bardzo wyraźnie okresy o dużej i małej częstości opadów. I tak, szczególnie duża liczba dni z opadem była w latach 40. i na początku lat 50. XIX wieku. Najwyższa roczna liczba dni z opadem – 239 (65% dni roku) wystąpiła w roku 1844. We wszystkich miesiącach tego roku



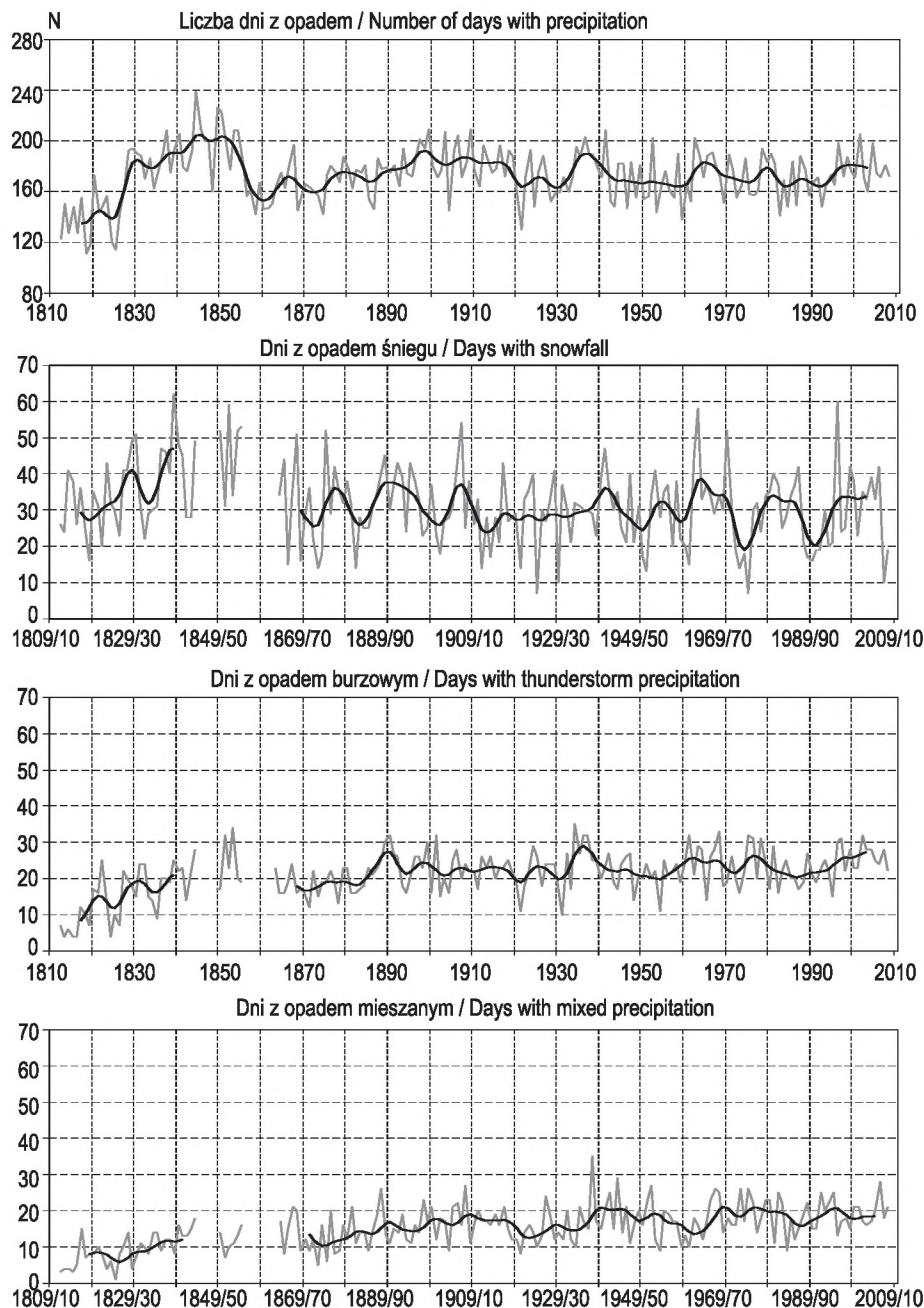
Rys. 9.3. Występowanie dni z opadem gradu (1812–1855)

Fig. 9.3. Occurrence of days with hail (1812–1855)

Tabela 9.3. Skrajne liczby dni z z różnymi postaciami i typami opadów; w nawiasie podano kody opadów zgodnie z tabelą 1.1 (1812–1855)

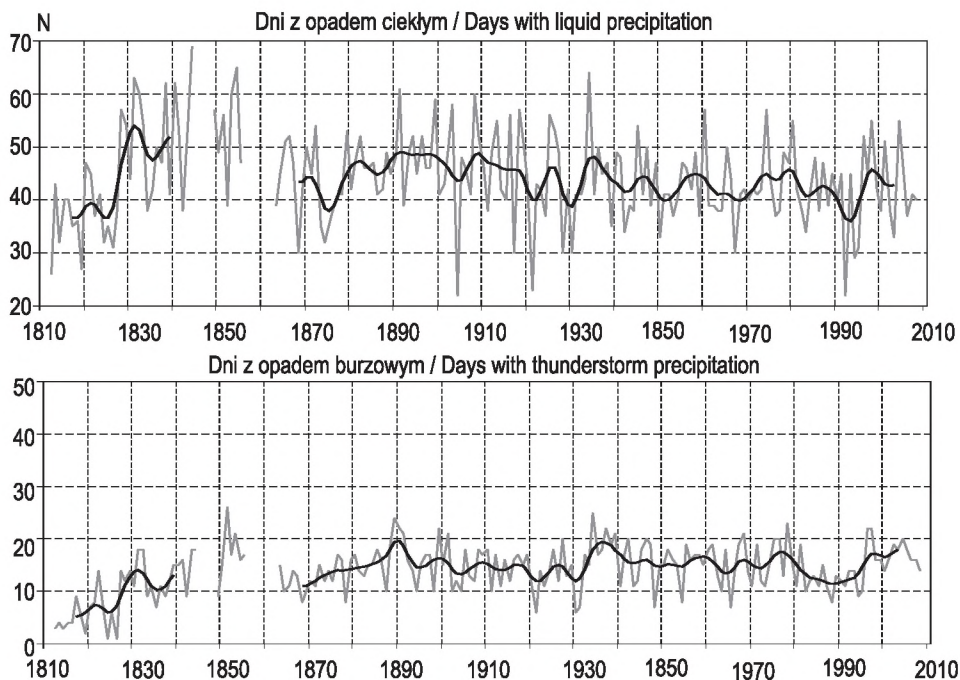
Table 9.3. Extreme number of days with various precipitation types; (precipitation codes according to Table 1.1) (1812–1855)

Okres Period	Ciekle / Liquid (1, 5, 8, 9)		Mieszane / Mixed (2)		Śnieg / Snowfall (3, 7)		Burzowe / Thunder- storm (7, 8, 9)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
III–V	18	45	0	9	3	25	0	8
VI–VIII	26	69	0	0	0	0	1	26
IX–XI	17	55	0	5	0	16	0	6
XII–II	3	32	0	10	9	40	0	1
I–XII	80	168	0	18	13	64	3	34



Rys. 9.4. Przebieg wieloletni rocznej liczby dni z opadem (N); wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1812–2008)

Fig. 9.4. Variation of the annual number of days (N); values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1812–2008)

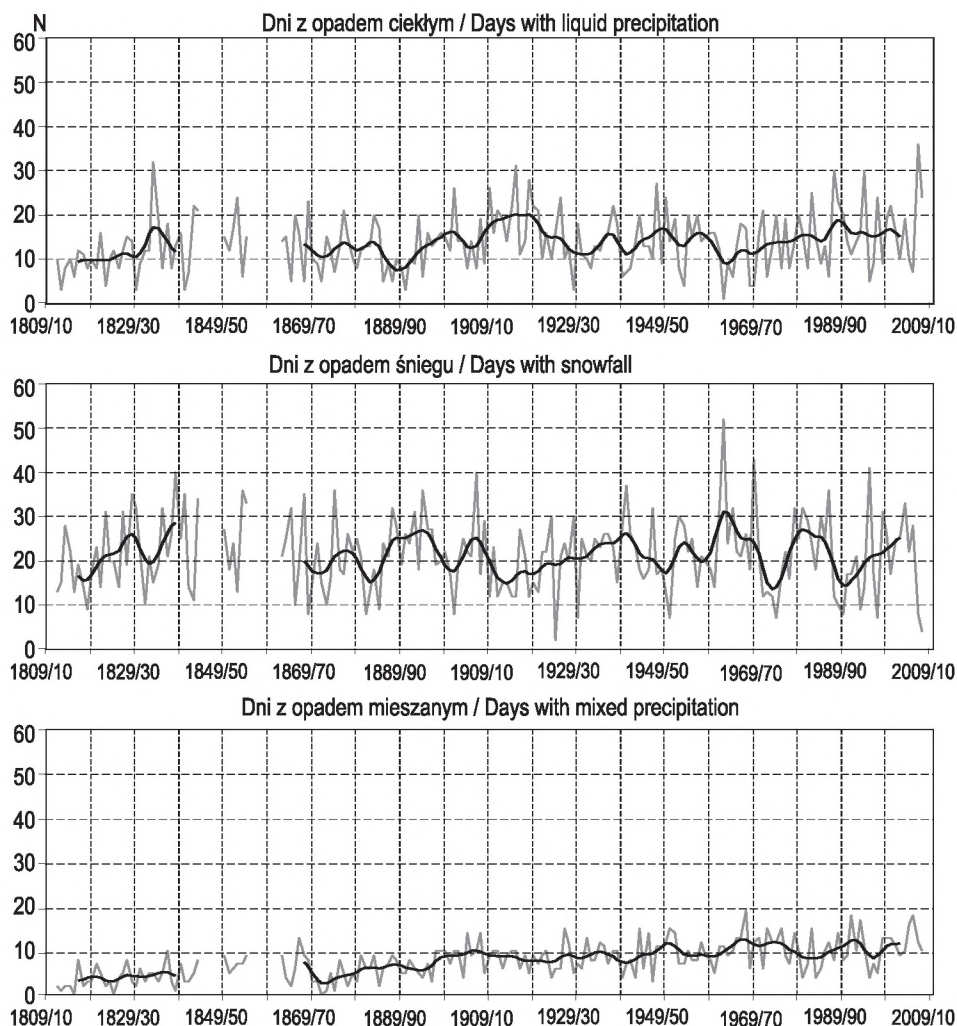


Rys. 9.5. Przebieg wieloletni liczby dni z opadem (N) w lecie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1812–2008)

Fig. 9.5. Variation of the number of days with precipitation (N) in summer; values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter (1812–2008)

liczba dni z opadem była większa od wartości średnich wieloletnich 1812–1855. Jak wcześniej wspomniano, najwięcej dni opadowych było w lecie (rys. 9.5) – w lipcu 30, a w sierpniu 27 (tab. 9.1). Są to także najwyższe wartości w tych miesiącach w całym okresie obserwacji. Drugie i trzecie dziesięciolecie XIX wieku to z kolei okres o bardzo małej częstości występowania opadów, bez względu na postać i typ. I tak, najniższa roczna liczba dni z opadem wyniosła 111, co stanowi 30% dni; wystąpiła ona w roku 1819. Poniżej 120 dni z opadem stwierdzono także w latach 1819, 1824 i 1825. Od połowy lat 30. do połowy lat 40. XIX wieku można stwierdzić także wyraźnie większą częstość opadów śniegu, zarówno w liczbie dni z opadem w roku (rys. 9.4), jak i w zimie (rys. 9.6). Na przykład w sezonie śnieżnym od października 1838 do maja 1839 roku liczba dni z opadem śniegu wyniosła 62 i była największa w całym okresie obserwacji 1812–2008.

Ogólnie można powiedzieć, że duża zmienność liczby dni z opadem na początku XIX wieku nawiązuje do dużej zmienności warunków termicznych, co wykazały badania J. Trepińskiej i L. Kowanetza (1997). Przejawem tej zmienności było występowanie zarówno surowych, jak i łagodnych zim oraz gorących i chłodnych sezonów letnich. I tak, najniższa średnia miesięczna temperatura powietrza w całym okresie



Rys. 9.6. Przebieg wieloletni liczby dni z opadem (N) w zimie; wartości wygładzone 11-letnim filtrem Gaussa (1812–2008)

Fig. 9.6. Variation of the number of days with precipitation (N) in winter (values are smoothed by the 11-year Gaussian low pass filter), 1812–2008

obserwacji pogody w Krakowie wystąpiła w grudniu 1829 ($-13,7^{\circ}\text{C}$), a najwyższa $22,6^{\circ}\text{C}$ w lipcu 1834 roku.

Można sądzić, że do ukazanego obrazu zmienności liczby dni z opadem na początku XIX stulecia nawiązuje zmienność sum opadów. Związek korelacyjny między obiema charakterystykami opadów jest bowiem znaczący, co zostało wykazane w rozdziale 2 pracy.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie badań opartych na serii obejmującej prawie półtora wieku (1863–2008) obserwacji opadu w Krakowie oraz katalogu typów cyrkulacji atmosferycznej i kalendarza mas powietrznych i frontów atmosferycznych oraz wskaźników cyrkulacji nad południową Polską i Atlantykiem Północnym rozpatrzono cechy charakterystyczne, częstość i wielkość opadów atmosferycznych w Krakowie oraz ich uwarunkowania cyrkulacyjne. W badaniach wykorzystano cały jednorodny ciąg sum dobowych opadów oraz informację o jego postaci i typie z okresu pomiarów instrumentalnych i liczbę dni z opadem z lat 1812–1855.

Weryfikacja przyjętych hipotez badawczych pokazała, że określenie relacji między typem opadu a jego częstością nie jest jednak łatwe, co wynika ze złożoności systemu klimatycznego oraz sprzężeń zwrotnych między poszczególnymi jego komponentami. Ponadto położenie obszaru badań tej pracy w umiarkowanych szerokościach geograficznych, a więc w zasięgu adwekcji mas powietrznych o różnych cechach termicznych i wilgotnościowych, jest przyczyną dużego zakresu wahań temperatury, która decyduje o postaci opadu docierającego do powierzchni ziemi.

* * *

Średnia liczba dni z opadem w roku w Krakowie wynosi 174, a więc w prawie co drugim dniu roku (48%) pojawia się opad atmosferyczny w ilości mierzalnej, tzn. przynajmniej 0,1 mm. Liczba dni z opadem jest bardzo zmienna – w rozpatrywanym wielolecu wahała się od 130 (1921) do 215 dni (1897). W przebiegu rocznym dni z opadem najwięcej jest w grudniu (15,9), a najmniej we wrześniu (12,7); skrajne miesięczne liczby dni z opadem zmieniają się od 0 (październik 1950) do 30 dni (styczeń 1963).

Średnia roczna suma opadów w Krakowie wynosi 676 mm i podobnie jak liczba dni z opadem podlega wielkiej zmienności w czasie: w najsuchszym roku 1993 wyniosła 448 mm (66% średniej sumy wieloletniej), a w najbardziej obfitym w opady roku 1912 osiągnęła 999,8 mm (148% średniej sumy wieloletniej). W ciągu roku najwięcej opadów występuje w lecie – średnio 274 mm (41% sumy rocznej), a zwłaszcza w lipcu – 97 mm (14% sumy rocznej), najmniej zaś w zimie – 98 mm (14% sumy rocznej), a szczególnie w lutym – 29 mm (4% sumy rocznej). Skrajne sumy miesięczne wahają się od 0 mm (październik 1950) do 313,1 mm (lipiec 1903).

Z konfrontacji średniej liczby dni z opadem ze średnią ich sumą wynika, że **średnia wydajność** opadów (tzn. średnia suma w dniu z opadem) wynosi 3,9 mm na dobę

i zmienia się od 2,1 mm w styczniu do 6,5 mm na dobę w lipcu. Większa wydajność opadów letnich jest związana z ich genezą – częściej niż w innych porach roku są to opady konwekcyjne.

Wśród dni z opadem atmosferycznym zdecydowanie przeważają te z **opadem w postaci ciekłej** (tzn. deszcz i niekiedy mżawka), co jest oczywistą konsekwencją utrzymywania się przez większą część roku dodatniej temperatury powietrza. Wśród wszystkich 174 dni z opadem dni z opadem ciekłym jest 124, tzn. 71%. W lecie (od czerwca do sierpnia) opady ciekłe stanowią praktycznie jedyną postać (tylko w czerwcu w ciągu 146 lat dwukrotnie pojawiły się opady mieszane), w maju i wrześniu stanowią postać przeważającą (ponad 90%), a tylko w zimie ich częstość wyraźnie maleje na rzecz opadów stałych (głównie śnieg) i mieszanych (śnieg z deszczem). W styczniu tylko co trzeci dzień przynosi wyłącznie opad ciekły.

Wkład opadów ciekłych w sumę roczną jest większy, niż wynikałoby to z ich częstości – wynosi on 558 mm, co stanowi 82% średniej sumy rocznej. W poszczególnych miesiącach udział opadów ciekłych w sumie miesięcznej waha się od 28% w lutym do 100% w lipcu i sierpniu, a niewiele mniejszy (ponad 99%) jest ponadto w czerwcu i wrześniu.

Z faktu, że udział sum opadów ciekłych w sumie rocznej (82%) jest większy niż udział dni z takim opadem (71%), wynika, że opady ciekłe są **bardziej wydajne** niż pozostałe postacie opadów. Znajduje to potwierdzenie w liczbie dni o wysokich opadach, tzn. ≥ 10 mm na dobę, których średnio w roku jest w Krakowie 18, a sporadycznie zdarzają się opady nawet ≥ 30 mm na dobę.

W chłodniejszej części roku pojawiają się opady w **postaci śniegu** (opady stałe z wyjątkiem gradu: śnieg, śnieg ziarnisty, krupa śnieżna, igły lodowe) – wyłącznie lub w połączeniu z opadem ciekłym (śnieg z deszczem). Opad może opuścić chmurę w postaci wyłącznie stałej (choć też od początku może mieć postać mieszaną) i podczas przechodzenia przez cieplejszą warstwę powietrza pod chmurą ulec częściowemu stopieniu, aby opaść na podłoże w dwójakiej postaci (oczywiście może też ulec całkowitemu stopieniu i spaść jako deszcz). Ponieważ więc opady stałe i mieszane mogą powstawać w podobnych warunkach, ich występowanie odznacza się podobnym okresem w ciągu roku. Najwcześniej opady zarówno śniegu, jak i mieszane pojawiają się we wrześniu, najpóźniejsze zaś w maju, a nawet stwierdzono przypadki opadów mieszanych w czerwcu.

Ogólnie, w ciągu roku dni z opadem śnieżnym jest 30, tzn. 17% dni z opadem, a z opadem mieszanym 17 dni, tzn. 10%. Dni z opadem śnieżnym najwięcej jest w zimie (47%), a zwłaszcza w styczniu (52%), z opadem mieszanym zaś w marcu (30%). W kwietniu, maju i październiku więcej jest opadów mieszanych niż śnieżnych, od listopada do marca zaś opady śnieżne przeważają nad mieszanymi.

Wkład w sumę roczną opadów śnieżnych wynosi 55 mm, tzn. 8%, a opadów mieszanych 63 mm, tzn. 10%. Największy udział w średniej sumie miesięcznej opady śniegu osiągają w zimie (38%), a zwłaszcza w lutym (44%), opady mieszane zaś w marcu (31%). Opady mieszane są dwukrotnie **bardziej wydajne** (3,8 mm/dobę) niż opady śnieżne (1,9 mm/dobę), ale mniej wydajne niż ciekłe (4,5 mm/dobę).

Przebieg roczny udziału poszczególnych postaci opadów wyraźnie wskazuje na ich **związek z temperaturą powietrza**. Związek ten występuje również w poszczególnych porach roku i zaznacza się zarówno w częstotliwości pojawiania się dni z różną postacią opadu, jak i pochodzącą z nich sumą opadów. I tak, wzrostowi temperatury o 1°C w lecie odpowiada spadek liczby dni z deszczem i mżawką o 4, a sum opadów o 33 mm, w zimie zaś ich wzrost o 3 dni i 5 mm. W zimie ponadto przy wzroście temperatury o 1°C zachodzi spadek częstotliwości i sum opadów śnieżnych o 2,4 dnia i o 5 mm oraz wzrost opadów mieszanych odpowiednio o 0,7 dnia i 2,0 mm. Ogólnie, ze zmianami temperatury powietrza bardziej związana jest liczba dni z opadem niż sumy opadów. Z tego wynika, że temperatura powietrza wpływa przede wszystkim na pojawianie się procesów opadotwórczych, a wielkość opadów zależy od ilości pary wodnej zawartej w powietrzu, chociaż ta także potencjalnie jest związana z temperaturą powietrza (silnie wzrasta wraz z nią). Dlatego najwyższe opady występują w porze letniej.

Bardzo ważną cechą opadów jest postać (ciekła i/lub stała), warto też jednak zwrócić uwagę na inne cechy, które można objąć ogólną nazwą **typu opadów**. Są to opady związane z burzą, opady gradu i opady marznące.

Opady burzowe i grad są wynikiem silnej konwekcji, typowej dla cieplejszej części roku, i chociaż burza może wystąpić w ciągu całego roku (w zimie burza na froncie chłodnym), to jednak w Krakowie praktycznie okres burzowy stanowią tylko miesiące od kwietnia do września. Średnio w roku dni z burzą jest 22, z czego najwięcej w lipcu – 5,6, a dni z gradem 4. Średnia suma opadów w dniu z burzą wynosi 8,3 mm, jest więc większa o 3,8 mm niż średnio w dniu z opadem ciekłym (4,5 mm). Częstość i sumy opadów burzowych wykazują słaby związek z temperaturą powietrza, jedynie w półroczu ciepłym występuje istotna korelacja między liczbą dni z tym typem opadów a średnią temperaturą.

Groźne zjawisko, jakim są **opady marznące**, występuje rzadko – średnio w roku 4 dni, z czego najwięcej 1,4 dnia w grudniu. Sumy dobowe tych opadów wynoszą średnio 2 mm.

* * *

Występowanie opadów jest **silnie uwarunkowane cyrkulacyjnie**. Ich pojawianiu się szczególnie sprzyjają układy niskiego ciśnienia i związane z nimi fronty atmosferyczne. Znajduje to wyraz w różnych charakterystykach cyrkulacji: największe prawdopodobieństwo wystąpienia i wielkość opadów jest w cyklonalnych typach cyrkulacji, dniach ze zmianą masy powietrznej, dniach z różnymi frontami, a także z silną cyklonicznością (wskaźnik C). Występowaniu opadów sprzyja też adwekcja wilgotnych mas powietrznych, która w Polsce, a zatem i w Krakowie, zachodzi głównie z sektora zachodniego, co przejawia się w związku opadów z Oscylacją

Północnoatlantycką (NAO) i nasileniem cyrkulacji z zachodu (wskaźnik W), a także w występowaniu mas polarnych morskich.

Wpływ cyrkulacji na częstość i sumy opadów wykazuje wyraźną **zmienność sezonową**. **Opady ciekłe** osiągają największe prawdopodobieństwo w lecie przy 4 typach cyrkulacji: Nc, NEc, Cc i Bc – po około 75–80%. W porach przejściowych prawdopodobieństwo to zmniejsza się z uwagi na występowanie innych typów opadów. Wyraźnie odmienny obraz prawdopodobieństwa wystąpienia opadów ciekłych występuje w zimie. Przy cyrkulacji NEa nie stwierdza się opadów ciekłych w ogóle, a przy typach adwekcyjnych z kierunków N, NE i E oraz bezadwekcyjnych Ca i Ka prawdopodobieństwo nie przekracza 5%. Najwyższe średnie sumy opadów ciekłych zdarzają się w dniach z tymi typami cyrkulacji, przy których jest duże prawdopodobieństwo wystąpienia opadu. Latem i w porach przejściowych są to więc typy: Nc, NEc, Cc i Bc. W lecie największy średni dobowy opad występuje przy cyrkulacji Nc, wiosną i jesienią NEc, w zimie zaś Ec.

Najsilniejszy związek częstości i sum opadów ciekłych uzyskano ze wskaźnikiem W i NAO w zimie, a ze wskaźnikiem cykloniczności w jesieni. I tak, wskaźnik cyrkulacji zachodniej (W) objaśnia 35% wariancji dni z opadem ciekłym w styczniu, a wskaźnik cykloniczności (C) 38% wariancji w lipcu.

Występowaniu opadów śniegu zarówno w zimie, jak i w porach przejściowych najbardziej sprzyjają typy cyrkulacji Nc, NEc i Ec, przy czym ich najwyższe sumy dobowe występują w typie Ec. W zimie ponadto opady śnieżne z największym prawdopodobieństwem występują w powietrzu PA, ale osiągają w nim najniższe średnie sumy, podobnie jak w PPK, co jest wynikiem małej wilgotności tych mas. Występowaniu opadów śnieżnych w tej porze najbardziej sprzyja front okluzji. Związek opadów śnieżnych najbardziej zaznacza się ze wskaźnikiem NAO i wskaźnikiem W. W zimie Oscylacja Północnoatlantycka (NAO) wyjaśnia 28% wariancji dni z opadem śniegu. **Opady mieszane** w zimie i w okresie śnieżnym występują z największym prawdopodobieństwem w typach Wc, NWc, Cc i Bc, a wiosną i jesienią także w typach Nc, NEc i Ec. Najwyższe sumy osiągają w typie NEc. Związek występowania opadów mieszanych ze wskaźnikami cyrkulacji okazał się słabszy.

Opady burzowe są najbardziej prawdopodobne w typach cyrkulacji Bc, Cc i Sc oraz typach cyklonalnych z napływem powietrza z sektora południowego, ale ich największa wydajność przypada na typ NEc. Podobnie jest w przypadku opadów dobowych silnych. **Opady marznące** natomiast pojawiają się z największym prawdopodobieństwem w sytuacji SEc.

Opady w jednorodnej masie powietrznej, tzn. wewnątrzmasowe, pojawiają się rzadziej i są mniej obfite. Opady w strefach frontów atmosferycznych zdarzają się z około dwukrotnie większym prawdopodobieństwem niż opady wewnątrzmasowe. Wyjątkiem są opady śnieżne w zimie, kiedy prawdopodobieństwo ich wystąpienia jest w obu sytuacjach podobne. Opady ciekłe najrzadziej występują w masach powietrza arktycznego i polarnego kontynentalnego, czyli masach o małej zawartości pary wodnej.

* * *

Zarówno częstość, jak i wielkość opadów podlegają **wielkiej zmienności w czasie**, co jest konsekwencją wielkiej zmienności warunków cyrkulacyjnych w strefie umiarkowanej, zdominowanych przez działalność cyklonalną. Chociaż występowanie i ilość opadów wykazują zależność od temperatury powietrza, to w całym rozpatrywanym okresie 146 lat nie występuje spodziewany wzrost liczby dni z opadem i sum opadów w całym roku. **Trendy stwierdzono** natomiast w miesiącach i sezonach; częściej zaznaczają się one w liczbie dni niż w sumach opadów. Sumy opadów bowiem podlegają znacznie większym zmianom niż liczba dni z opadem i tylko bardzo duże zmiany w ilości opadów mogą osiągać istotność statystyczną, co oznacza, że do zmian częstości opadów nie muszą nawiązywać zmiany ich sum.

Istotne statystycznie zmiany zarówno częstości, jak i sum opadów występują jedynie w zimie i styczniu. Są to zmiany pozytywne, spowodowane przede wszystkim znaczącym wzrostem opadów mieszanych. Trend rosnący obu charakterystyk tych opadów wystąpił także w ich wartościach rocznych, co jednak nie przełożyło się na trend ogólnej liczby dni i sum opadów oraz w opadach stałych na wiosnę.

W całym sezonie letnim oraz w sierpniu pojawił się trend spadkowy liczby dni z opadem ciekłym, w grudniu zaś wzrost. Sumy opadów ciekłych natomiast nie wykazały zmian. Na uwagę zasługuje trend malejący liczby dni z opadem śnieżnym i rosnący liczby dni z opadem mieszanym w grudniu, a więc w miesiącu o największym wzroście temperatury powietrza w ciągu rozpatrywanego okresu.

Ocieplenie wpłynęło na skrócenie okresu z opadami śniegu (na skutek coraz wcześniejszego ostatniego dnia z takim opadem). W ciepłym okresie roku (w ostatnich latach coraz cieplejszym) wzrosła częstość i ilość opadów burzowych i opadów gradu.

Wyraźnie rysuje się kierunek zmian opadów w ostatnich latach, a więc okresie o największym wzroście temperatury powietrza. Od 1996 roku utrzymuje się tendencja wzrostowa sum i częstości rocznych opadów ciekłych. Mokra 2 ostatnie lata, 2009 i 2010, potwierdzają utrzymywanie się tej tendencji. Taki kierunek tendencji opadów jest wynikiem wzrostu głównie opadów ciekłych, jaki wystąpił w zimie i w porach przejściowych.

* * *

Jest to pierwsze tak szczegółowe, oparte na obszernym i wiarygodnym materiale wyjściowym, opracowanie zmienności rocznej i wieloletniej opadów z rozróżnieniem na ich postać i typ w Polsce i Europie Środkowej. Większość badań z tego zakresu prowadzono w krajach skandynawskich oraz w Kanadzie, co zostało udokumentowane w części wstępnej opracowania.

Uzyskane wyniki z opracowania serii krakowskiej opadów są istotne z punktu widzenia badania zmian i zmienności klimatu w skali regionalnej oraz praktycznych zastosowań w wielu dziedzinach działalności człowieka, m.in. w komunikacji i budownictwie. Zmiany opadów atmosferycznych obserwowane w wielu miejscach na

świecie wykazują bowiem różną wielkość i kierunek zmian i nie zawsze nawiązują do zmian temperatury powietrza, ponieważ o ich występowaniu decyduje głównie zawartość pary wodnej w atmosferze oraz czynniki geograficzne.

Wyniki badań wpływu cyrkulacji na opady pokazały, że typy cyrkulacji, masy powietrzne i fronty atmosferyczne decydują o ich postaci i typie, co wynika z sezonowych różnic we właściwościach termicznych i wilgotnościowych mas powietrznych. Najwyraźniejsze są jednak zależności opadów od typów cyrkulacji, które uwzględniają nie tylko charakter cyrkulacji antycyklonalny albo cyklonalny, ale także kierunek adwekcji mas powietrznych. Ponadto na opady bardziej wpływają cechy cyrkulacji regionalnej (wskaźniki W, S i C) niż makroskalowej (Oscylacja Północnoatlantycka). Związki występowania opadów z cyrkulacją z zachodu są najsilniejsze w zimie, a więc w okresie, kiedy jest jej największe nasilenie oraz istnieje największy kontrast termiczny między masami polarnymi morskimi i kontynentalnymi.

Ocieplenie klimatu w ostatnich latach przyczyniło się do wzrostu częstości i sum opadów ciekłych, szczególnie w okresie zimowym, co jest wynikiem znaczącego wzrostu temperatury w tej porze roku. Jeśli utrzyma się trend wzrostowy temperatury powietrza, to należy oczekiwać, że w Polsce Południowej opadów śnieżnych będzie coraz mniej i będą dostarczać coraz mniej wody. Opadów ciekłych będzie także prawdopodobnie mniej, a nasilenie procesów konwekcyjnych będzie raczej prowadziło do większej częstości groźnych zjawisk atmosferycznych, a także zwiększenia ilości opadów burzowych. Deficyt wody opadowej może być pogłębiony przez wzmożone parowanie na skutek wzrostu temperatury powietrza. Możliwe są okresy o skrajnych warunkach opadowych – gorące i suche (2006), jak i o bardzo obfitych opadach (2010). Nie wyraża się to w związkach statystycznych dotyczących okresu prawie półtora wieku, ale przejawia się w zjawiskach zachodzących na naszych oczach.

Zatem konsekwencją zmieniającego się klimatu może być wzrost częstości i ilości opadów ciekłych w zimie, a ich spadek w lecie. Trzeba jednak zaznaczyć, że scenariusze zmian opadów są obarczone znacznie większą dozą niepewności niż scenariusze zmian temperatury powietrza.

Ze względu na duże znaczenie klimatyczne, jak i praktyczne, dalsze badania zmienności postaci i typów opadów w powiązaniu z warunkami cyrkulacyjnymi wydają się celowe w innych regionach Polski, nawet na podstawie krótszych serii obserwacji.

LITERATURA

- Bartnicki L., 1955, *Zagadnienia klimatologiczne dotyczące opadów w postaci stałej*, Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny, 8 (2), 163–164.
- Bartnicki L., Wierzbicki Z., 1962, *Udział opadów stałych w ogólnej sumie opadów w Polsce*, Prace PIHM, 66, 3–15.
- Bednorz E., 2004, *Snow cover in eastern Europe in relation to temperature, precipitation and circulation*, International Journal of Climatology, 24, 591–601.
- Bednorz E., 2008, *Synoptic reasons for heavy snowfalls in the Polish-German lowlands*, Theoretical and Applied Climatology, 92, 133–140.
- Bergeron T., 1928, *Über die dreidimensional verknüpfende Wetteranalyse*, I. Teil [*Three-dimensionally combining synoptic analysis*, Part I], Geofysiske Publikasjoner, 5, 1–111.
- Bernstein B.C., 2000, *Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events*, Weather and Forecasting, 15, 485–508.
- Bezrukova N.A., Jeck R.K., Khalili M.F., Minina L.S., Naumov A.Ya., Stulov E.A., 2006, *Some statistics of freezing precipitation and rime for the territory of the former USSR from ground-based weather observations*, Atmospheric Research, 82, 203–221.
- Bielec-Bąkowska Z., 2001, *Long-term variability of thunderstorms and thunderstorm precipitation occurrence in Cracow, Poland, in the period 1896–1995*, Atmospheric Research, 56, 161–170.
- Bielec-Bąkowska Z., 2002, *Zróźnicowanie przestrzenne i zmienność wieloletnia występowania burz w Polsce*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Bielec-Bąkowska Z., Łupikasza E., 2009, *Long-term precipitation variability of thunderstorm days in Poland (1951–2000)*, Atmospheric Research, 93, 506–515.
- Birkeland K.W., Mock C.J., 1996, *Atmospheric circulation patterns associated with heavy snowfall events*, Bridger Bowl, Montana, U.S.A. Mountain Research and Development, 16, 281–286.
- Bołaszewska J., Reutt F., 1962, *Częstotliwość występowania poszczególnych mas powietrza w Polsce w okresie 10-ciu lat 1946–1955*, Prace PIHM, 66, Warszawa.
- Bradley R., Diaz H., Eischeid J., Jones P., Kelly P., Goodess C., 1987, *Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century*, Science, 273, 171–175.
- Brázdil R., 1998, *Časová a prostorová analýza bourek, krupobití a extrémních srážek v jižní části Moravy v období 1946–1995*, Meteorologické Zprávy, 51, 45–52.
- Brandes E.A., Spar J., 1971, *A search for necessary conditions for heavy snow on the east coast*, Journal of Applied Meteorology, 11, 397–409.
- Bromwich D.H., 1988, *Snowfall in high southern latitudes*, Reviews of Geophysics, 26, 149–168.
- Butler D.R., 1986, *Snow-avalanche hazards in Glacier National Park, Montana, meteorological and climatological aspects*, Physical Geography, 7, 72–87.
- Cebulska M., Twardosz R., 2010, *Zmienność czasowa najniższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły (1901–2000)*, Przegląd Geofizyczny, 3–4, 175–188.
- Changnon S.A., 1985, *Secular variations in thunder-day frequencies in the Twentieth Century*, Journal of Geophysical Research, 90, D4, 6181–6194.
- Changnon S.A., 2001, *Thunderstorm Rainfall in the Conterminous United States*, Bulletin of the American Meteorological Society, 3, 1925–1940.

- Changnon S.A., Creech T.G., 2003, *Sources of data on freezing rain and resulting damages*, Journal of Applied Meteorology, 42, 1514–1518.
- Changnon S.A., Karl T.R., 2003, *Temporal and Spatial Variations of Freezing Rain in the Contiguous United States. 1948–2000*, Journal of Applied Meteorology, 42, 1302–1304.
- Changnon S.A., Changnon D., 2006, *A Spatial and Temporal Analysis of Damaging Snowstorms in the United States*, Natural Hazards, 37, 373–389.
- Changnon S.A., Changnon D., Karl T.R., 2006, *Temporal and Spatial Characteristics of Snowstorms in the Contiguous United States*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45, 1141–1155.
- Cortinas J.J., 2000, *A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America*, Monthly Weather Review, 128, 3574–3588.
- Dai A., 2001, *Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part I: Seasonal and Interannual variations*, Journal of Climate, 14, 1092–1111.
- Davis R.E., Lowit M.B., Knappenberger P.C., 1999, *A climatology of snowfall temperature relationships in Canada*, Journal of Geophysical Research, 104, 11985–11994.
- Dimitrova T., Mitzeva R., Savtchenko A., 2009, *Environmental conditions responsible for the type of precipitation in summer convective storms over Bulgaria*, Atmospheric Research, 93, 30–38.
- Dobrovolny P., 1993, *Snow as an indicator of climate change*, Scripta Facultatis Scientiarum Universitatis Masaryk Brunensis, 23, 25–34.
- Durkee J.D., Frye J.D., Fuhrmann C.M., Lacke M.C., Jeong H.G., Mote T.L., 2007, *Effects of the North Atlantic Oscillation on precipitation-type frequency and distribution in the eastern United States*, Theoretical and Applied Climatology, 94, 51–65.
- Falarz M., 2007, *Snow cover variability in Poland in relation to the macro- and mesoscale atmospheric circulation in the twentieth century*, International Journal of Climatology, 27, 2069–2081.
- Fitzharris B.B., 1981, *Frequency and Climatology of Major Avalanches at Rogers Pass, 1909–1977*, National Research Council, Canadian Association Committee on Geotechnical Research, Ottawa.
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I., 2003, *Climate variations and implications for precipitation types in the Norwegian Arctic*, Norwegian Meteorological Institute, Report no. 24/02 KLIMA: 21.
- Gay D.A., Davis R.E., 1993, *Freezing rain and sleet climatology of the southeastern USA*, Climate Research, 3, 209–220.
- Giaiotti D., Nordio S., Stel F., 2003, *The climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia*, Atmospheric Research, 67–68, 247–259.
- Glossary of Meteorology*, 2000, American Meteorological Society, Boston.
- Goree P.A., Younkin R.J., 1966, *Synoptic climatology of heavy snowfall over the Central and Eastern United States*, Monthly Weather Review, 94, 663–668.
- Groisman P.Y., Easterling D.R., 1994, *Variability and trends of total precipitation and snowfall over the United States and Canada*, Journal of Climate, 7, 184–205.
- Hanik J., 1972, *Dzieje meteorologii i obserwacji meteorologicznych w Galicji od XVIII do XX wieku*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław.
- Hantel M., Ehrendorfer M., Haslinger A., 2000, *Climate sensitivity of snow cover duration in Austria*, International Journal of Climatology, 20, 615–640.
- Harrington J.A., Cervený R.S., Dewey K.F., 1987, *A climatology of mean monthly snowfall for the conterminous United States: temporal and spatial patterns*, Journal of Climate and Applied Meteorology, 26, 897–912.
- Harrington J.A., Cervený R.S., 1988, *Temporal statistics: an application in snowfall climatology*, Physical Geography, 9, 337–353.
- Hartley S., 1996, *Atlantic sea-surface temperatures and New England snowfall*, Hydrological Processes, 10, 1553–1563.
- Hartley S., Keables M.J., 1998, *Synoptic associations of winter climate and snowfall variability in New England, USA, 1950–1992*, International Journal of Climatology, 18, 281–298.

- Houston T.G., Changnon S.A., 2007, *Freezing rain events: a major weather hazard in the conterminous US*, *Natural Hazards*, 40, 485–494.
- Huntington T.G., Hodgkins G.A., Keim B.D., Dudley R.W., 2004, *Changes in the Proportion of Precipitation Occurring as Snow in New England (1949–2000)*, *Journal of Climate*, 17, 2626–2636.
- Hurrell J.W., 1995, *Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation*, *Science*, 269, 676–679.
- Hurrell J.W., 1996, *Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on northern hemisphere temperature*, *Geophysical Research Letter*, 23, 665–668.
- Hurrell J.W., van Loon H., 1997, *Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation*, *Climatic Change*, 36, 301–326.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [w:] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (red.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jaagus J., 1997, *The impact of climate change on the snow cover pattern in Estonia*, *Climate Change*, 36, 65–77.
- Jones P.D., Hulme M., 1996, *Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations*, *International Journal of Climatology*, 16, 361–377.
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D., 1997, *Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland*, *International Journal of Climatology*, 17, 1433–1450.
- Kamyshevanova V.A., 1974, *Thunderstorm activity over USSR and its relationship with atmospheric circulation types in the Northern Hemisphere*, [w:] *Studies in Atmospheric Electricity*, Leningrad, 14–22.
- Karl T.R., Groisman P.Ya., Knight R.W., Heim R.R. Jr., 1993, *Recent variations of snow cover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations*, *Journal of Climate*, 6, 1327–1344.
- Ke Ch.-Q., Yu T., Yu K., Tang G.-D., King L., 2009, *Snowfall trends and variability in Qinghai, China*, *Theoretical and Applied Climatology*, 98, 251–258.
- Klein Tank A.M.G., Wijngaard J.B., Können G.P., Böhm R., Demarée G., Gocheva A., Miletta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C., Heino R., Bessemoulin P., Müller-Westermeier G., Tznakou M., Szalai S., Páldóttir T., Fitzgerald D., Rubin S., Capaldo M., Maugeri M., Lietass A., Bukantis A., Aberfeld R., van Engelen A.F.V., Forland E., Mielus M., Coelho F., Mares C., Razuvaev V., Nieplova E., Cegnar T., Antonio López J., Dahlström B., Moberg A., Kirchhofer W., Ceylan A., Pachaliuk O., Alexander L.V., Petrovic P., 2002, *Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for European Climate Assessment*, *International Journal of Climatology*, 22, 1441–1453.
- Kocin P.J., Uccellini L.W., 2004, *Northeast Snowstorms*, Vol. I: Overview, Vol. II: The cases, Meteorological Monographs, Vol. 32, No. 54, American Meteorological Society, Boston.
- Kolendowicz L., 2005, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej oraz temperatury i wilgotności powietrza na występowanie dni z burzą na obszarze Polski*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Kolendowicz L., 2007, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na występowanie dni z burzą w Polsce w latach 1971–2000*, [w:] K. Piotrowicz i R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków, 103–109.
- Kosiba A., 1954, *Opady śnieżne na Śląsku*, Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego, ser. B, 71, 40.
- Kossowska-Cezak U., Bajkiewicz-Grabowska E., 2008, *Podstawy hydrometeorologii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

- Koźmiński Cz., 1963, *Opady gradowe na terenie Polski w latach 1946–1955*, Szczecińskie Towarzystwo Naukowe, Wydział Nauk Przyrodniczo-Rolniczych, 17 (2), 1–46.
- Kożuchowski K. (red.), 2004, *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Zakład Dynamiki Środowiska i Bioklimatologii UŁ, Łódź.
- Kożuchowski K., Żmudzka E., 2003, *100-year series of areally averaged temperatures and precipitation totals in Poland*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne, 2542 (75), 116–122.
- Kunkel K.E., Angel J.R., 1999, *Relationship of ENSO to snowfall and related cyclone activity in the contiguous United States*, Journal of Geophysical Research, 104, 19425–19434.
- Kunkel K.E., Palecki M.A., Hubbard K.G., Robinson D.A., Redmond K.T., Easterling D.R., 2007, *Trend Identification in Twentieth-Century U.S. Snowfall: The Challenges*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 24, 64–73.
- Kupczyk E., 1997, *Accumulation and melting of snow (in Polish)*, [w:] U. Soczyńska (red.), *Hydrologia dynamiczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 122–138.
- Lamb H.H., 1972, *British Isles Weather Types and a Register of Daily Sequence of Circulation Patterns, 1861–1971*, Geophysical Memorial, 116, HMSO, London.
- Laternser M., Schneebeli M., 2003, *Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99)*, International Journal of Climatology, 23, 733–750.
- Leathers D.J., Mote T.L., Kuivinen K.C., McFeeters S., Kluck D.R., 1993, *Temporal characteristics of USA snowfall 1945–1946 through to 1984–1985*, International Journal of Climatology, 13, 1, 65–76.
- Lupikasza E., 2007, *Opady atmosferyczne*, [w:] A.A. Marsz i A. Styszyńska (red.), *Klimat rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie – stan, zmiany i ich przyczyny*, Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia, 185–196.
- Lupikasza E., 2008, *Zależność występowania rodzajów opadów od temperatury powietrza w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1978–2007*, Problemy Klimatologii Polarnej, 18, 99–112.
- Lupikasza E., Niedźwiedź T., Twardosz R., 2010, *Snowfall in Krakow and its link to atmospheric circulation during the period 1951–2008*, Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie, 183 (4), 90–107.
- Madany R., 1961, *O opadach śniegu i szacie śnieżnej w Karpatach Polskich w okresie 1951–1955*, Przegląd Geofizyczny, 3, 132–152.
- McGinnis D.L., 2000, *Synoptic controls on Upper Colorado river basin snowfall*, International Journal of Climatology, 20, 131–149.
- Merecki R., 1915, *Klimatologia ziem polskich*, Wydawnictwo J. Cotty, Warszawa.
- Mock C.J., Kay P.A., 1992, *Avalanche climatology of the western United States, with an emphasis on Alta, Utah*, The Professional Geographer, 44 (3), 307–318.
- Morin E., Goodrich D.C., Maddox R.A., Gao X., Gupta H.V., Sorooshian S., 2006, *Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response*, Advances in Water Resources, 29, 843–860.
- Moszczyńska J., 1969, *Zróżnicowanie opadów w postaci stałej i pokrywy śnieżnej na krawędzi Wyżyny Łódzkiej*, Zeszyty Naukowe UŁ, ser. 2, 32, 31–50.
- Mote T.L., Gamble D.W., Underwood S.J., Bentley M.L., 1997, *Synoptic-Scale Features Common to Heavy Snowstorms in the Southeast United States*, Weather and Forecasting, 12, 5–23.
- Murray R., Lewis R.P., 1966, *Some aspects of the synoptic climatology of the British Isles as measured by simple indices*, Meteorological Magazine, 95, 193–203.
- Namias J., 1985, *Some Empirical Evidence for the Influence of Snow Cover on Temperature and Precipitation*, Monthly Weather Review, 113, 1542–1553.
- Niedźwiedź T., 1981, *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu dorzecza górnej Wisły*, Rozprawy Habilitacyjne UJ, 58.
- Niedźwiedź T., 2000, *Variability of the atmospheric circulation above the Central Europe in the light of selected indices*, [w:] B. Obrębska-Starkel (red.), *Reconstructions of Climate and its*

- Modelling*, Prace Geograficzne, 107, Institute of Geography of the Jagiellonian University, 379–389.
- Niedźwiedz T., 2002, *Relacje między NAO a wskaźnikami cyrkulacji nad Polską*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia, 87–97.
- Niedźwiedz T., 2003, *Częstość występowania mas powietrza w Polsce Południowej w drugiej połowie XX wieku. Postępy w badaniach klimatycznych i bioklimatycznych*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 188, 65–74.
- Niedźwiedz T., 2006, *Typologia cyrkulacji atmosfery dla Polski i metody określania regionalnych wskaźników cyrkulacji*, Annales UMCS, Sectio B, LXI, 326–335.
- Niedźwiedz T., 2011, *Kalendarz typów cyrkulacji dla obszaru Polski Południowej (09.1873–18.01.2011)*, Katedra Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec, plik komputerowy dostępny online: <http://klimat.wnoz.us.edu.pl/>.
- Niedźwiedz T., Twardosz R., Walanus A., 2009, *Long-term variability of precipitation series in east central Europe in relation to circulation patterns*, Theoretical and Applied Climatology, 98, 337–350.
- Obrębska-Starkłowa B., 1997, *Współczesne poglądy na zmiany klimatyczne w Europie w okresie schyłku małego glaciału*, [w:] J. Trepińska (red.), *Wahania klimatu w Krakowie (1792–1995)*, Instytut Geografii UJ, Kraków, 163–190.
- Osborn T.J., 2006, *Recent variations in the winter North Atlantic Oscillation*, Weather, 61, 353–355.
- Parczewski W., 1964, *Fronty atmosferyczne nad Polską*, Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, 59, 20–36.
- Piotrowicz K., 2007, *Temperatura powietrza*, [w:] D. Matuszko (red.), *Klimat Krakowa w XX wieku*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, 99–112.
- Przybylak R., 2002, *Variability of total and solid precipitation in the Canadian Arctic from 1950 to 1995*, International Journal of Climatology, 22, 395–420.
- Rauber R.M., Olthoff L.S., Ramamurthy M.K., Miller D., Kunkel K.E., 2001, *A synoptic weather pattern and sounding-based climatology of freezing precipitation in the United States East of the Rocky Mountains*, Journal of Applied Meteorology, 40, 1724–1747.
- Roberts E., Stewart R.E., 2008, *On the occurrence of freezing rain and ice pellets over the Eastern Canadian Arctic*, Atmospheric Research, 89, 93–109.
- Robbins C.C., Cortinas J.V. Jr., 2002, *Local and synoptic environments associated with freezing rain in the contiguous United States*, Weather and Forecasting, 17, 47–65.
- Sapalski J., 1852, *O burzach gradowych w Królestwie Polskim*, Biblioteka Warszawska, 4, 317–336.
- Schmuck A., 1959, *Zarys klimatologii Polski*, PWN, Warszawa.
- Schönwiese Ch.D., 2000, *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, Gebrüder Borntraeger, Berlin–Stuttgart.
- Schuster S.S., Blong R.J., Speer M.S., 2005, *A hail climatology of the greater Sydney area and New South Wales, Australia*, International Journal of Climatology, 25, 1633–1650.
- Serreze M.C., Clark M.P., McGinnis D.L., 1998, *Characteristics of Snowfall over the Eastern Half of the United States and Relationships with Principal Modes of Low-Frequency Atmospheric Variability*, Journal of Climate, 11, 234–250.
- Sioutas M., Meaden T., Webb J.D.C., 2009, *Hail frequency, distribution and intensity in Northern Greece*, Atmospheric Research, 93, 526–533.
- Sioutas M.V., Flocas H.A., 2003, *Hailstorms in Northern Greece: synoptic and thermodynamic environment*, Theoretical and Applied Climatology, 75, 189–202.
- Spreitzhofer G., 1999a, *Synoptic classification of severe snowstorms over Austria*, Meteorologische Zeitschrift, 8, 3–15.

- Spreitzhofer G., 1999b, *Spatial, temporal and intensity of heavy snowfall events over Austria*, Theoretical and Applied Climatology, 62, 209–219.
- Spreitzhofer G., 2000, *On the Characteristics of Heavy Multiple-Day Snowfalls in the Eastern Alps*, Natural Hazards, 21, 35–53.
- Stewart R.A., Isaac G.A., 1999, *Freezing precipitation in Canada*, Atmosphere-Ocean, 37, 87–102.
- Stopa M., 1962, *Burze w Polsce*, Prace Geograficzne IG PAN, 34, 108–185.
- Suckling P.W., Kimsey M.B., 1988, *Seasonal snowfall totals in northern New England: recent trends and variability*, Climatological Bulletin, 22, 15–25.
- Trepińska J., 1988, *Wieloletni przebieg ciśnienia i temperatury powietrza w Krakowie na tle ich zmienności w Europie*, Rozprawy Habilitacyjne UJ, 140, Kraków.
- Trepińska J., Kowanetz L., 1997, *Wieloletni przebieg średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza w Krakowie, 1792–1995*, [w:] J. Trepińska (red.), *Wahania klimatu w Krakowie (1792–1995)*, Instytut Geografii UJ, Kraków, 99–130.
- Twardosz R., 1997, *Homogenizacja serii pomiarów opadów atmosferycznych na stacji meteorologicznej w Krakowie*, [w:] J. Trepińska (red.), *Wahania klimatu w Krakowie (1792–1995)*, Instytut Geografii UJ, Kraków, 89–95.
- Twardosz R., 2002–2003, *Zmienność opadów śniegu na Pogórzu Wielickim w latach 1971–2000*, Folia Geographica, Ser. Geographica Physica, 33–34, 105–115.
- Twardosz R., 2003a, *Long-Term Snowfall Variability in Cracow*, Acta Universitatis Wratislaviensis 2542, Prace Geograficzne, 75, 180–188.
- Twardosz R., 2003b, *Variabilité des précipitations sous forme de neige à «Pogórze Karpackie»*, Dokumentacja Geograficzna, 29, 341–344.
- Twardosz R., 2003c, *Origines et évolution des fortes chutes de neige dans le sud de la Pologne (Cracovie, 1863–2000)*, Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 15, 187–192.
- Twardosz R., 2005a, *Zmienność silnych opadów śniegu w Krakowie (1863–2000)*, [w:] E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, J. Szkutnicki (red.), *Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne*, Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW, Warszawa, 198–204.
- Twardosz R., 2005b, *Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886–2002)*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- Twardosz R., 2007a, *Opady atmosferyczne*, [w:] D. Matuszko (red.), *Klimat Krakowa w XX wieku*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, 127–138.
- Twardosz R., 2007b, *Obserwacje opadów atmosferycznych w Galicji w latach 1792–1919*, [w:] M. Miętus, J. Filipiak, A. Wyszowski (red.), *200 lat regularnych pomiarów i obserwacji meteorologicznych w Gdańsku*, Monografie IMGW, Warszawa, 56–69.
- Twardosz R., 2009, *Fale niezwykłych upałów w Europie na początku XXI wieku*, Przegląd Geofizyczny, 3–4, 193–204.
- Twardosz R., 2010, *The importance of research into form and type of precipitation in the study of climate change*, Acta Agrophysica 183, Rozprawy i Monografie, 4, 22–37.
- Twardosz R., Cebulska M., 2010, *Observations and Measurements of Precipitation in the Polish Province of Galicia in the Nineteenth Century*, [w:] R. Przybylak i in. (red.), *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*, Springer Science + Business Media B.V., 457–471.
- Twardosz R., Niedźwiedz T., 2001, *Influence of synoptic situations on the precipitation in Kraków (Poland)*, International Journal of Climatology, 21, 467–481.
- Twardosz R., Niedźwiedz T., Łupikasza E., 2010a, *The influence of atmospheric circulation on the type of precipitation (Kraków, southern Poland)*, Theoretical and Applied Climatology, 104, 233–250.

- Twardosz R., Niedźwiedź T., Łupikasa E., 2010b, *Burze gradowe w Krakowie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne (1863–2008)*, [w:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Instytut Geografii Uniwersytetu J. Kochanowskiego, Kielce, 295–305.
- Twardosz R., Walanus A., 2011, *Niezależne od rozkładu praktyczne testowanie istotności różnic średnich w seriach opadowych*, Przegląd Geofizyczny, (w druku).
- Vinet F., 2001, *Climatology of hail in France*, Atmospheric Research, 56, 309–323.
- Webb J.D.C., Elsom D.M., Reynolds D.J., 2001, *Climatology of severe hailstorms in Great Britain*, Atmospheric Research, 56, 293–310.
- Wierzbicki Z., 1959, *Stosunek opadów w postaci stałej do całkowitej sumy opadów w Polsce*, Prace i Studia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, cz. I, Warszawa, 1–15.
- WMO (World Meteorological Organization), 1956, *World Distribution of Thunderstorm Days*, WMO, Publ. No. 21, TP. 21.
- WMO (World Meteorological Organization), 1988, *Manual on codes*, Vol. 1, WMO, Publ. 306.
- Woś A., 2010, *Klimat Polski*, Wydawnictwo Bogucki, Poznań.
- Ye H., 2008, *Change in frequency of precipitation types associated with surface air temperature over Northern Eurasia during 1936–90*, Journal of Climate, 21, 5807–5819.
- Ye H., Mather J.R., 1997, *Polar snow cover changes and global warming*, International Journal of Climatology, 17, 155–162.
- Younkin R.J., 1968, *Circulation patterns associated with heavy snowfall over the western United States*, Monthly Weather Review, 96, 851–853.
- Zhang X., Hogg W.D., Mekis E., 2001, *Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada*, Journal of Climate, 14, 1923–1936.

SUMMARY

This study into the annual and long-term variability of types and form of precipitation was based on a 146-year precipitation record from Krakow spanning the period 1863–2008 and on a catalogue of circulation systems in southern Poland proposed by T. Niedźwiedź. This catalogue covers circulation types from the period 1874–2008 and air masses and atmospheric fronts from the period 1951–2008.

Using the body of qualitative and quantitative observations available in Krakow, a reliable database was built up including diurnal precipitation totals (≥ 0.1 mm) and details of the type and form of precipitation. These were coded in accordance with the classification by T. Niedźwiedź (Table 1.1). Numbers of days and corresponding totals were identified and associated with the following precipitation types:

- liquid (drizzle and rain, codes: 1, 5, 8, 9);
- snowfall (solid without hail; snow and various forms, codes: 3, 7);
- mixed (code 2);
- thunderstorm (codes: 7, 8, 9) and hail (codes: 5 and 9); and
- freezing (the most reliable data for this type of precipitation was obtained from 1920 onwards).

Additionally, the study included the number of days with precipitation during the period 1812–1855.

The scale and direction of precipitation change was based on a linear regression analysis. Precipitation change was linked to air temperature change.

The influence of circulation patterns on precipitation was measured using conditional probability of occurrence and average daily totals in a given type/air mass/front. Precipitation characteristics were determined separately on days with and without a front (air-mass precipitation).

The research demonstrated that understanding of the relationship between the type and frequency of precipitation was not an easy task due to the complexity of the climatic system and to feedback loops that existed between its various components.

It was shown that in Krakow liquid precipitation was predominant on 73% of the days with precipitation in a year (Table 4.1). It accounted for all the precipitation in summer, while in winter it occurred on one in every three days with precipitation. Liquid precipitation accounted for 82% of the total annual precipitation and for 33% of wintertime precipitation. Snowfall constituted 17% of days with precipitation in a year, 47% in winter and peaked in January with 52% of days with precipitation (Table 5.2). This form of precipitation accounted for 8% of the total annual precipitation and for 38% in winter. The remaining 10% share of days with precipitation was accounted for by mixed precipitation (Table 6.1).

Thunderstorm precipitation is the most important of the precipitation types considered here. This occurs all year round and accounts for 13% of the total days with precipitation, including 35% in summer and 39% in July (Table 7.1). Thunderstorm precipitation contributes 28% of the annual precipitation total and in summer up to 50% (Table 7.6). Hailstorm precipitation frequency peaks in late spring and early summer, at which time it constitutes up to 4% of all days with precipitation (Table 7.2). Freezing precipitation tends to be dangerous for road traffic in winter, but its potential season is much longer and lasts from September to May (Table 8.1).

The highest average precipitation totals for all types and forms are recorded in summer and the lowest in winter. There is no statistically significant difference between precipitation in spring and autumn. The highest daily precipitation totals were recorded on days with a hailstorm.

Precipitation patterns vary very widely between years. For example, the proportion of liquid precipitation in the total ranged from 2 to 81% in winter and between 0 and 96% in December (Table 4.3).

Krakow, like many other places, records a very wide range of air temperature variation (Table 4.7). Liquid, snow and mixed precipitation all display statistically significant relationships with air temperature (Tables: 4.5–4.6, 5.7–5.8 and 6.7–6.8), but the correlation was weak with thunderstorm precipitation (Fig. 7.1).

No statistically significant trends were identified in the overall long-term numbers, whether of days with precipitation or of precipitation totals (Table 2.3 and 2.6). Such trends were discovered at the monthly and seasonal levels; more so in terms of the number of days than in totals. The latter are indeed less variable than the former and only very large changes in precipitation totals have a potential to reach statistical significance, which means that precipitation frequency changes are not necessarily linked to any totals changes.

Statistically significant changes of both the frequency and totals were only observed in winter and in January. This increase was mostly attributable to significantly higher mixed precipitation values. There was also a trend towards an increase in both variables of the annual mixed precipitation, but this failed to translate into overall trends for either of them.

The number of days with liquid precipitation followed a trend towards a decline in summer and a trend towards an increase in December. There was no change in the totals. There was a notable trend for a decline in the number of days with snowfall and for an increase of this variable in mixed precipitation in December, the month with the greatest increase in air temperature.

Statistically significant trends towards an increase were also identified in frequencies and totals of thunderstorm and hailstorm precipitation. Additionally, the snowfall season was shrinking and the last day with snowfall was occurring earlier in the year.

There was also a clear trend-line in the change of precipitation in recent years. Since 1996, there has been a continued trend to an increase in the totals and frequencies of liquid precipitation. The wet years of 2009 and 2010 confirmed the persistence of this trend. This overall trend is primarily a result of an increase in liquid precipitation observed in winter and in the transitional seasons.

An analysis of the impact of circulation on precipitation has shown that types of circulation, air masses and atmospheric fronts determine the form and type of precipitation. The strongest dependence was established between precipitation and circulation types, including high or low pressure systems and air mass advection sector.

The impact of circulation on the frequency and totals displays a seasonal variability. In summer liquid precipitation is most likely to occur in four types of circulation: Nc, NEc, Cc and Bc, which represent 75–80% of cases. During the transitional seasons, the likelihood decreases as other precipitation types increase in frequency. During the NEa type, no liquid precipitation was found, while in types with advection from N, NE and E, as well as in non-advection types Ca and Ka, the likelihood did not exceed 5%. The highest average precipitation totals occur in the circulation types most conducive to an occurrence of precipitation. In summer and in the transitional seasons, these are: Nc, NEc, Cc and Bc. In summer, the highest daily totals is recorded during the Nc type; in spring and autumn – NEc; and in winter – Ec.

Snowfall, both in winter and in the transitional seasons, is most likely in types: Nc, NEc and Ec, and the highest daily totals are recorded in the Ec type. The highest likelihood of mixed precipitation is split between winter and the snowfall season, on the one hand, when it peaks in types Wc, NWc, Cc and Bc, and the transitional seasons, on the other, when it also often occurs in types Nc, NEc and Ec. The greatest totals values are recorded in type NEc.

Thunderstorm precipitation was most likely in types Bc, Cc and Sc, as well as in cyclonic types with southern air advection, but it achieved its greatest intensity in type NEc. Freezing precipitation was most frequent in the SEc situation.

The influence of air masses and fronts on the occurrence of precipitation was less strong than that of circulation types. Liquid precipitation in summer, spring and autumn and thunderstorm precipitation were the most likely on days with an air-mass change or with the passage of an atmospheric front.

Frontal precipitation was approximately twice as likely as air-mass precipitation. Snowfall in winter was one exception, as it was equally as likely to occur in association with a front as within a uniform air mass.

The study demonstrated the existence of statistically significant relationships between precipitation and indicators of atmospheric circulation where a stronger influence was exerted by regional circulation than by macroscale circulation (NAO).

In summary, the recent climate warming has been contributing to a greater frequency and greater totals of liquid precipitation, especially in wintertime, which is a result of a significant air temperature increase during the latter season. No trends of similar strength were identified in summer.

If the trend to an increase in air temperature continues, less snowfall should be expected in southern Poland in terms of both frequency and totals. Also liquid precipitation will probably decline, while an intensification of free convection processes will probably lead to greater intensity of thunderstorm precipitation, a feature which is already observable. A deficit of precipitation water may become exacerbated by increased evaporation in the higher air temperatures. This means that climate change may bring about an increase in the frequency and totals of liquid precipitation in winter and a decline in summer.

REDAKTOR PROWADZĄCY

Jadwiga Makowiec

ADIUSTACJA JĘZYKOWO-STYLISTYCZNA

Jerzy Hrycyk

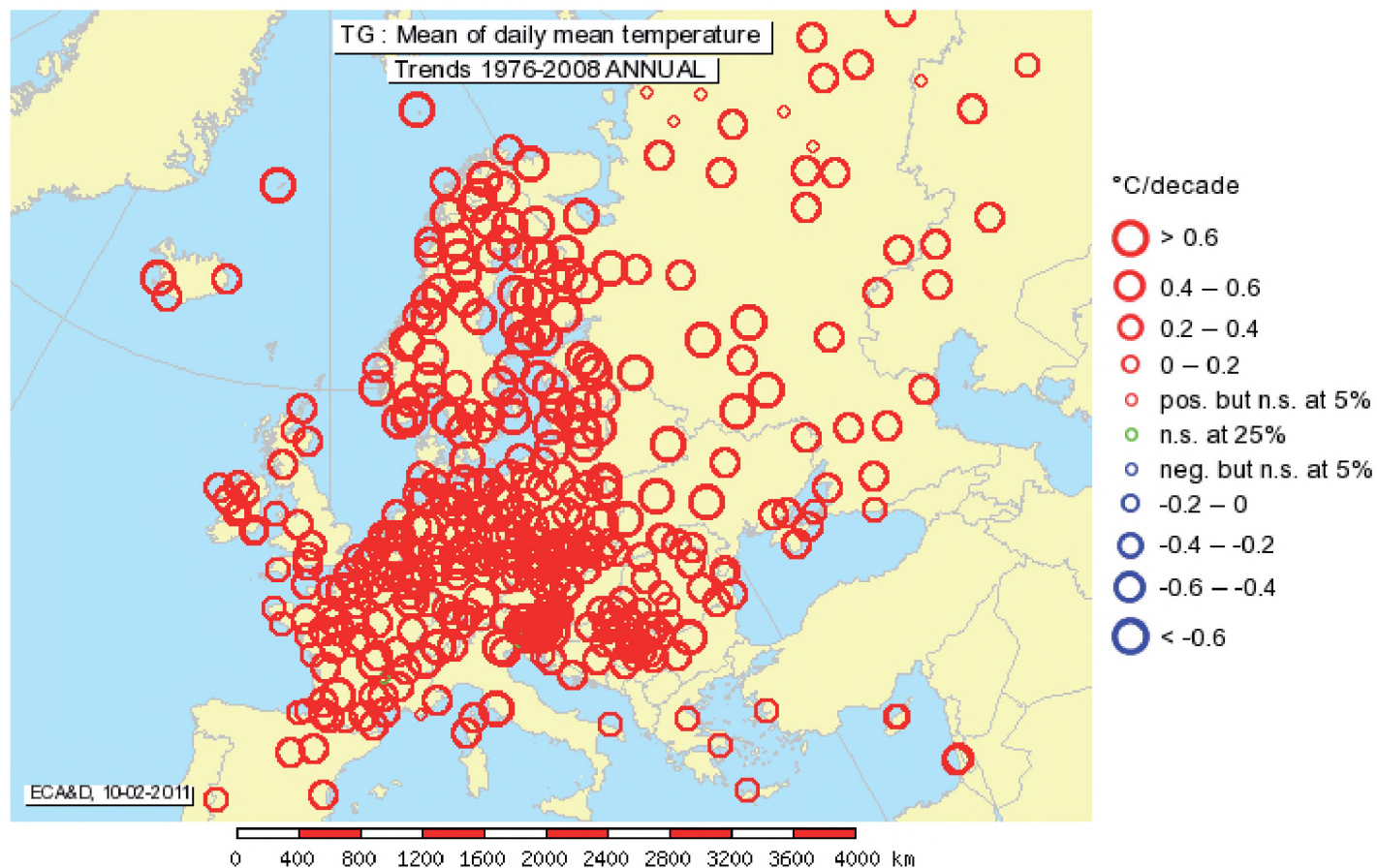
KOREKTA

Patrycjusz Piławski

SKŁAD I ŁAMANIE

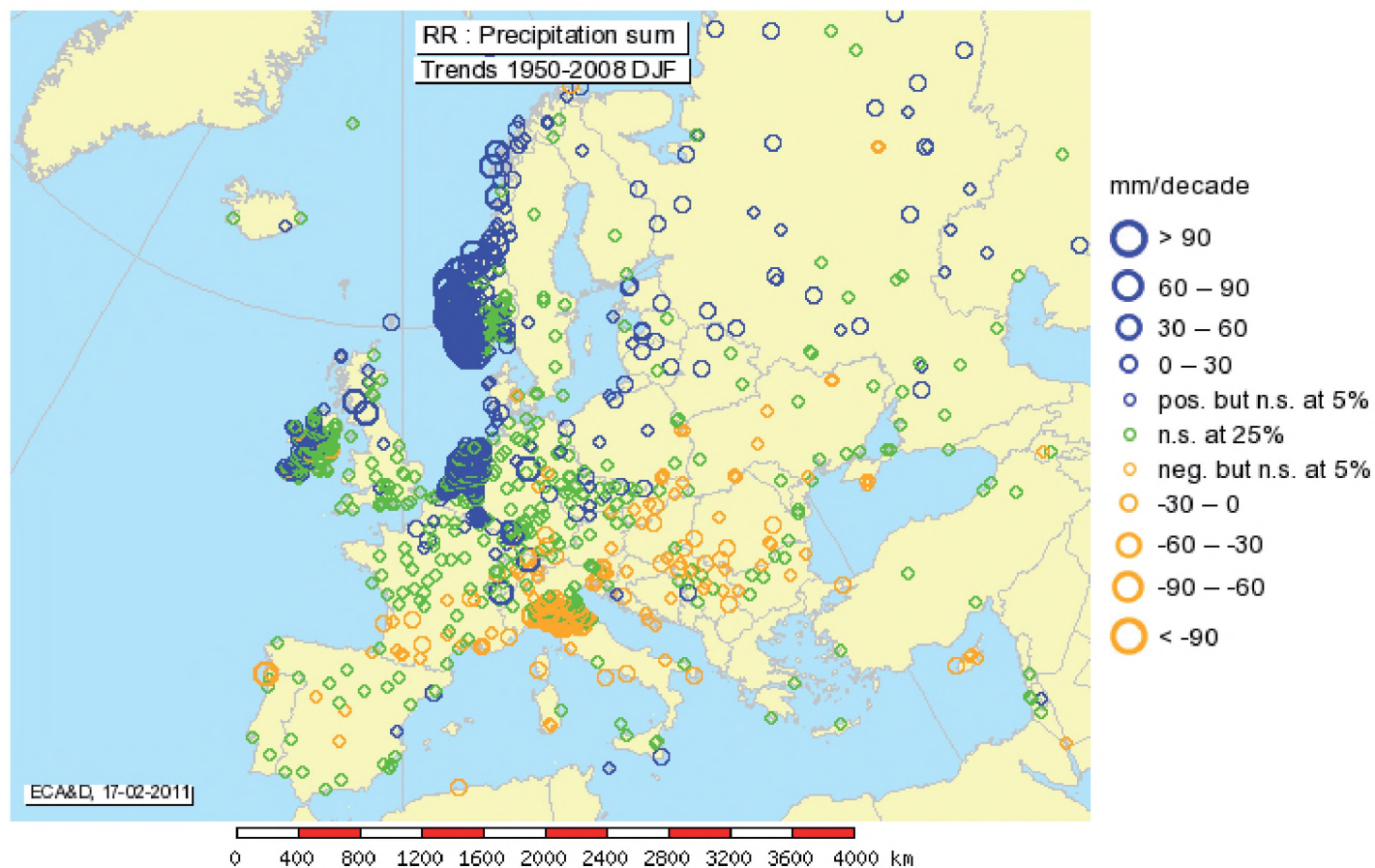
Hanna Wiechecka

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego
Redakcja: ul. Michałowskiego 9/2, 31-126 Kraków
tel. 12-631-18-80, tel./fax 12-631-18-83



Rys. 1.1. Trendy średniej rocznej temperatury powietrza (1976–2008) (www.knmi.nl)

Fig. 1.1. Trends of mean annual temperature (1976–2008) (www.knmi.nl)



Rys. 2.5. Trendy sum opadów w zimie (1950–2008) (www.knmi.nl)

Fig. 2.5. Trends of winter precipitation totals (1950–2008) (www.knmi.nl)